POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls
Auteur: Author:	Joséanne Bélanger-Gravel
Date:	2011
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Bélanger-Gravel, J. (2011). Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/757/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/757/
Directeurs de recherche: Advisors:	Oumarou Savadogo, & Christian Mascle
Programme: Program:	Génie métallurgique

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE EN COMPARAISON AVEC LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE ET ÉOLIEN SEULS

JOSÉANNE BÉLANGER-GRAVEL

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MÉTALLURGIQUE)

DÉCEMBRE 2011

© Joséanne Bélanger-Gravel, 2011.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE EN COMPARAISON AVEC LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE ET ÉOLIEN SEULS

présenté par : BÉLANGER-GRAVEL Joséanne

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme DESCHÊNES Louise, Ph.D., présidente

M. SAVADOGO Oumarou, D. d'état, membre et directeur de recherche

M. MASCLE Christian, Doctorat ès Sciences, membre et codirecteur de recherche

M. DESCHÊNES Daniel, M.Sc.A., membre

DÉDICACE

À mes jeunes frères et sœurs,
Joée, Alexandra, Marc-Antoine et Jérémy,
qui sont mon inspiration, ma force.

Et à Raphaël,
mon soutien et ma motivation,
sans qui ce mémoire n'aurait jamais abouti.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, un grand merci à Professeur Savadogo, mon directeur de recherche, pour son humour, sa grande générosité et pour sa compréhension et son appui dans mes démarches tout au long de la maîtrise.

Merci à Professeur Mascle, co-directeur de recherche, pour ses relectures et les discussions intéressantes.

Je remercie aussi les autres membres du jury d'avoir accepté l'invitation.

Merci Raphaël, pour ton soutien indispensable. Merci d'avoir mis à mon service tes compétences en programmation, ce qui m'a fait épargner beaucoup de temps.

Merci à mes frères et sœurs, surtout les plus vieux qui malgré leur jeune âge ont compris l'importance de ma démarche et m'ont encouragée, défendue et soutenue tout au long de mes études. Merci Joée ! Merci Alexe ! Merci Marco !

Je remercie les gens du bureau pour leurs encouragements, merci à Shant, François-Xavier, Nima, Michel, Jonathan et Marie. Merci à mes collègues, anciens collègues et amis : Ricardo, Kelvin, Shirley, Rodrigo, Rémi et Antoine pour avoir pris le temps de prendre des nouvelles régulièrement et pour vos encouragements, votre support. Parmi vous, merci à tous ceux qui se sont proposés pour m'aider à terminer ce mémoire.

Merci à tous ceux que j'aurais oublié et qui ont participé à la réussite de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Vu la grande superficie du territoire québécois, de nombreuses habitations sont isolées ou à une distance importante du réseau électrique, donc les coûts de raccordement au réseau sont gonflés et souvent, le raccordement est tout simplement impossible. Les systèmes autonomes sont donc intéressants pour alimenter en électricité les habitants de ces régions. L'utilisation de génératrices carburant aux énergies fossiles est la solution actuelle. Les systèmes seuls, éolien ou photovoltaïque, nécessitent beaucoup d'accumulateurs pour pallier à l'intermittence des gisements. Les systèmes hybrides autonomes avec des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes sont donc une solution potentielle limitant l'intermittence des ressources. L'analyse de diverses combinaisons de systèmes est réalisée en situation hors réseau et connectée au réseau.

L'hypothèse principale de ce travail est que si un système photovoltaïque est joint à un système éolien hors réseau au Québec, cela permet de diminuer les moments sans apport d'énergie, donc on diminue les possibilités d'intermittence du système. Ainsi, la quantité d'accumulateurs nécessaires peut être diminuée. Cette diminution du nombre d'accumulateurs et de la taille des systèmes installés se traduit en économies pour l'ensemble du système. L'objectif était de comparer des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec des systèmes photovoltaïque ou éolien seuls pour un site hors réseau au Québec et par rapport à d'autres sites ailleurs dans le monde. Par une comparaison, la situation actuelle (diésel et connectée au réseau) a aussi été étudiée. Dans un premier temps, les systèmes seuls sont étudiés. L'analyse des différentes combinaisons de systèmes hybrides hors réseau et connectée au réseau est effectuée. L'originalité du projet provient dans l'addition d'un système photovoltaïque à un système éolien dans un contexte québécois et hors réseau.

Globalement, les systèmes seuls, éoliens ou photovoltaïques, sont une option moins viable que l'option des systèmes combinés utilisant ces deux énergies. En général, pour le cas des systèmes autonomes, il est économiquement rentable d'ajouter des éoliennes aux systèmes avec génératrice diésel. Si les coûts des équipements ou du diésel évoluent, l'ajout de panneaux solaires à ces systèmes sera justifié. Quand les coûts d'électricité auront légèrement augmentés et que les coûts de rachat de l'électricité par le réseau seront intéressants, l'ajout de panneaux solaires, d'éoliennes et de génératrices diésel au système sera rentable pour le particulier dans le cas de systèmes connectés au réseau.

ABSTRACT

Given Quebec's vastness, numerous homes are located in remote areas or considerably far away from the electric grid. Tying these homes to the grid is often very expensive or even impossible. Stand-alone systems are thus prime candidates to provide the energy requirements for the inhabitants of isolated locations. Currently, fossil fuel generators are the most widespread solutions. Wind- or photovoltaic-only systems require large amounts of batteries to compensate for the intermittence of resource availability. Stand-alone hybrid systems that combine both wind turbines and photovoltaic solar panels address this issue. Various combinations of both stand-alone and grid-connected systems are analysed.

The premise of this work is that the addition of photovoltaic panels to a stand-alone wind-turbine system (in Quebec) will increase the system's robustness to resource intermittence thereby reducing the number of required accumulators. This reduction coupled with the resulting reduction in overall system size would lead to monetary savings. The objective was to compare hybrid wind and photovoltaic systems with wind- and photovoltaic-only systems for a number of off-grid sites in Quebec and abroad. The results are compared with the current -- diesel and grid-connected – situation. This work's contribution lies in the study of the coupling of photovoltaic systems with wind turbine systems in off-grid Quebec areas.

Overall, wind- or photovoltaic-only systems are less viable that hybrid systems that use both technologies. For stand-alone systems, it is usually cost effective to add wind-turbines to diesel generator systems. If equipment or fuel costs were to increase, it would then become cost-effective to also add solar panels. When the grid power price will have increased and sellback prices become worthwhile, adding solar panels, wind turbines and diesel generators to even grid-tied systems will become cost-effective.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX XI

LISTE DES FIGURES XIV

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XVII

LISTE DES ANNEXES XVIII

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 4

1.1 Les systèmes hybrides 4

1.2 Situation québécoise du photovoltaïque et des habitations isolées 6

1.2.1 Habitations en milieu isolé 6

1.2.2 Énergie fournie par les différentes technologies de panneaux solaires 6

1.3 Dimensionnement 6

1.3.1 Système photovoltaïque 7

1.3.2 Système éolien 7

1.3.3 Système avec génératrice au diésel 7

1.3.4 Systèmes hybrides 7

1.4 Développement durable et analyses de cycle de vie 8

1.4.1 ACV des systèmes seuls 9

1.4.2 ACV des différentes technologies 9

1.4.3 ACV des différentes sources d'énergie 11

1.4.4 Aspects communs entre les différentes études 14

1.4.5 Conclusions générales des ACV 15

1.4.6 Analyse économique 16

1.4.7 Analyse de l'aspect social 17

CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DES LOGICIELS 18

2.1 Survol des différents logiciels 18

2.1.1 Logiciels pour le photovoltaïque 18

2.1.2 Logiciels pour l'éolien 19

2.1.3 Logiciels pour les énergies renouvelables 19

2.2 Paramètres pour le choix des logiciels 19

2.2.1 Langue 20

2.2.2 Accessibilité à tous 20

2.2.3 Plusieurs technologies disponibles 21

2.2.4 Systèmes hors réseau 22

2.2.5 Simulation de systèmes dans plusieurs pays 22

2.2.6 Évaluation des coûts 22

2.2.7 Optimisation des systèmes 22

2.3 Logiciels choisis 22

2.4 Présentation de HOMER 27

2.4.1 Principales caractéristiques 28

2.4.2 Interfaces 29

2.4.3 Données à entrer 33

2.4.4 Résultats pouvant être obtenus 35

2.4.5 Options possibles 37

2.5 Présentation de RETScreen 39

2.5.1 Principales caractéristiques 39

2.5.2 Interfaces 41

2.5.3 Données à entrer 43

2.5.4 Résultats pouvant être obtenus 45

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 46

3.1 Démarche générale du projet 46

3.2 Stratégie pour l'étude des systèmes seuls 47

3.3 Stratégie pour l'étude des systèmes hybrides 47

3.4 Méthodologies spécifiques aux simulations 48

3.5 Méthodologie pour le système photovoltaïque 48

3.6 Méthodologie pour le système éolien 49

3.7 Méthodologie pour le système diésel 49

3.8 Résultats à analyser 49

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES DONNÉES UTILISÉES 50

4.1 Demande énergétique globale d'une résidence au Québec 50

4.1.1 Profil de consommation par mois pour l'année 50

4.1.2 Profils journaliers 51

4.1.3 Répartition de la demande énergétique pour le secteur résidentiel 53

4.2 Évaluation de la demande énergétique en électricité pour une résidence moyenne 54

4.2.1 Comparaison des données de gisement solaire RETScreen et HOMER 55

CHAPITRE 5 VALIDATION DES SIMULATIONS ET EFFET DU GISEMENT SUR LA CONSOMMATION 56

5.1 Validation des données d'ensoleillement de RETScreen et d'HOMER 56

5.2 Validation des simulations avec la consommation totale à Saint-Hubert 57

5.2.1 Comparaison des calculs manuels et des simulations pour le dimensionnement 58

5.2.2 Comparaison entre Saint-Hubert et un lieu très ensoleillé 61

5.2.3 Comparaison entre Saint-Hubert et un lieu très venteux 66

5.2.4 Validation avec les fichiers disponibles dans HOMER ou RETScreen 69

CHAPITRE 6 ÉTUDE COMPARATIVE DES SYSTÈMES SEULS, HYBRIDES AUTONOMES ET HYBRIDES CONNECTES AU RÉSEAU 70

6.1 Études des systèmes seuls avec HOMER et RETScreen 70

6.1.1 Systèmes seuls avec HOMER 70

6.1.2 Comparaison des résultats des systèmes seuls de HOMER et RETScreen 72

6.2 Systèmes hybrides 76

6.2.1 Systèmes hybrides avec analyses de sensibilité avec consommation totale 76

6.2.2 Comparaison des systèmes sans génératrice avec ceux connectés au réseau et analyses de sensibilité 88

6.2.3 Comparaison des systèmes hybrides avec systèmes connectés au réseau et analyses de sensibilité 95

CHAPITRE 7 RÉSULTATS GÉNÉRAUX DES ANALYSES ET DES SIMULATIONS 98

CONCLUSION 100

LISTE DES RÉFÉRENCES 103

ANNEXES 106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Paramètres pour le choix des logiciels – In my backyard 23

Tableau 2.2 Paramètres pour le choix des logiciels – EnergyPeriscope 24

Tableau 2.3 Paramètres pour le choix de logiciels – Hybrid2 25

Tableau 2.4 Paramètres pour le choix des logiciels – HOMER.....26

Tableau 2.5 Paramètres pour le choix des logiciels – RETScreen.....27

Tableau 4.1 Consommation d'énergie par utilisation finale en pourcentage entre 1990 et 2007 ..53

Tableau 5.1 Système photovoltaïque évalué avec les gisements de HOMER et de RETScreen pour la consommation totale de 48,88 kWh/j 57

Tableau 5.2 Système photovoltaïque évalué avec les gisements de HOMER et de RETScreen pour la consommation sans chauffage de 19,5 kWh/j.....57

Tableau 5.3 Système photovoltaïque évalué avec les gisements de HOMER et de RETScreen pour la consommation sans chauffage et avec appareils efficaces de 11,7 kWh/j.....57

Tableau 5.4 Comparaison des calculs manuels et des simulations sous HOMER pour Saint-Hubert avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système photovoltaïque ...59

Tableau 5.5 Comparaison de calculs manuels et des simulations sous HOMER pour Saint-Hubert avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système éolien 60

Tableau 5.6 Comparaison de calculs manuels et des simulations sous HOMER pour Saint-Hubert avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système diésel 60

Tableau 5.7 Moyenne d'ensoleillement pour Saint-Hubert et Djibo 61

Tableau 5.8 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très ensoleillé sous HOMER avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système photovoltaïque 61

Tableau 5.9 Détail des coûts d'opération pour le système photovoltaïque à Djibo pour une résidence moyenne 62

Tableau 5.10 Détail des coûts d'opération pour le système photovoltaïque à Saint-Hubert pour une résidence moyenne 62

Tableau 5.11 Calculs d'excès d'énergie pour Saint-Hubert pour le système photovoltaïque pour une résidence moyenne 63

Tableau 5.12 Calculs d'excès d'énergie pour Djibo pour le système photovoltaïque pour une résidence moyenne 64

Tableau 5.13 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très ensoleillé sous HOMER avec la consommation sans chauffage d'une résidence pour le système photovoltaïque 65

Tableau 5.14 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très ensoleillé sous HOMER avec la consommation sans chauffage et avec l'utilisation d'appareils efficaces d'une résidence pour le système photovoltaïque 66

Tableau 5.15 Moyenne de gisement éolien pour Saint-Hubert et Drogden 66

Tableau 5.16 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très venteux sous HOMER avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système éolien 67

Tableau 5.17 Détail des coûts d'opération pour le système éolien à Drogden pour une résidence moyenne 67

Tableau 5.18 Détail des coûts d'opération pour le système éolien à Drogden pour une résidence moyenne 67

Tableau 5.19 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très venteux sous HOMER avec la consommation sans chauffage d'une résidence pour le système éolien 68

Tableau 5.20 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très venteux sous HOMER avec la consommation sans chauffage et avec l'utilisation d'appareils efficaces d'une résidence pour le système éolien 69

Tableau 6.1 Résumé des systèmes simples étudiés avec HOMER pour Saint-Hubert pour la consommation totale de 48,88kWh/j 70

Tableau 6.2 Résumé des systèmes simples étudiés avec HOMER pour Saint-Hubert pour la consommation totale de 19,5kWh/j 71

Tableau 6.3 Résumé des systèmes simples étudiés avec HOMER pour Saint-Hubert pour la consommation totale de 11,7kWh/j 71

Tableau 6.4 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût des batteries 77

Tableau 6.5 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût des éoliennes 78

Tableau 6.6 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût des panneaux 79

Tableau 6.7 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût du diésel 81

Tableau 6.8 Analyse graphique du coût des panneaux en fonction du coût du diésel selon l'évolution du coût des éoliennes en conservant le coût des batteries fixe 83

Tableau 6.9 Analyse graphique du coût des panneaux en fonction du coût du diésel selon l'évolution du coût des batteries en conservant le coût des éoliennes fixe 84

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma typique du développement durable 8

Figure 2.1 Modèle conceptuel de HOMER 28

Figure 2.2 Interface HOMER – Fichier vierge 30

Figure 2.3 Interface HOMER – Équipements à ajouter 31

Figure 2.4 Interface HOMER – Équipements sélectionnés 31

Figure 2.5 Interface HOMER – Ressources 32

Figure 2.6 Interface HOMER – Fichier complété 32

Figure 2.7 Interface HOMER – Résultats des calculs 33

Figure 2.8 Données à fournir 34

Figure 2.9 Résultats obtenus après simulation 35

Figure 2.10 Résumé des résultats 36

Figure 2.11 Fenêtre des résultats détaillés 37

Figure 2.12 Données pour les analyses de sensibilité 38

Figure 2.13 Fenêtre des valeurs à entrer pour les analyses de sensibilité 39

Figure 2.14 Interface RETScreen 42

Figure 2.15 Interface RETScreen – Onglet « démarrer » 43

Figure 4.1 Profils de consommation pour l'année, identifiés par mois 50

Figure 4.2 Consommation journalière moyenne par mois 51

Figure 4.3 Profils journaliers – Janvier à avril 52

Figure 4.4 Profils journaliers – Mai à septembre 52

Figure 4.5 Profils journaliers – Octobre à décembre 53

Figure 6.1 Analyse financière RETScreen pour la consommation totale pour le système photovoltaïque seul à Saint-Hubert 73

Figure 6.2 Analyse financière RETScreen pour la consommation totale pour le système éolien seul à Saint-Hubert 74

Figure 6.3 Analyse financière RETScreen pour la consommation totale pour le système diésel seul à Saint-Hubert 75

Figure 6.4 Analyse des systèmes hors réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 76

Figure 6.5 Analyse graphique du coût des éoliennes en fonction du coût du diésel en conservant le coût des panneaux et des batteries fixe 85

Figure 6.6 Analyse graphique du coût des batteries en fonction du coût du diésel en conservant le coût des panneaux et des éoliennes fixe 86

Figure 6.7 Analyse graphique du coût des éoliennes en fonction du coût du diésel en conservant le coût batteries fixe avec le coût des panneaux à 50 % 87

Figure 6.8 Analyse graphique du coût des batteries en fonction du coût du diésel en conservant le coût éoliennes fixe avec le coût des panneaux à 50 % 87

Figure 6.9 Résultats tabulés de l'analyse des systèmes photovoltaïques connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 88

Figure 6.10 Résultats graphiques de l'analyse des systèmes photovoltaïques connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 89

Figure 6.11 Résultats tabulés de l'analyse du système photovoltaïque seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement .. 89

Figure 6.12 Résultats graphiques de l'analyse du système photovoltaïque seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 90

Figure 6.13 Analyse de la distance du réseau pour le seuil de rentabilité du système photovoltaïque en comparaison avec le système connecté au réseau 91

Figure 6.14 Résultats tabulés de l'analyse des systèmes éoliens connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 92

Figure 6.15 Résultats graphiques de l'analyse des systèmes éoliens connectés au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 92

Figure 6.16 Résultats tabulés de l'analyse du système éolien seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 93

Figure 6.17 Résultats graphiques de l'analyse du système éolien seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 94

Figure 6.18 Analyse de la distance du réseau pour le seuil de rentabilité du système éolien en comparaison avec le système connecté au réseau 94

Figure 6.19 Résultats tabulés de l'analyse des systèmes, sans génératrice diésel, connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 95

Figure 6.20 Résultats graphiques de l'analyse des systèmes, sans génératrice diésel, connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement ..96

Figure 6.21 Analyse des systèmes connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 96

Figure 6.22 Analyse de sensibilité sur le coût de rachat de l'électricité et le prix de l'électricité pour des systèmes connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement 97

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du cycle de vie
CO_2	Dioxyde de carbone
COE	Cost of Energy (coût de revient de l'énergie)
NPC	Net Present Cost (coût à la présente valeur actuelle)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PV	Photovoltaïque
RNCREQ	Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Présentation de HOMER 106

ANNEXE 2 – Méthodologie pour le photovoltaïque avec Homer 122

ANNEXE 3 – Méthodologie pour l'éolien avec Homer 139

ANNEXE 4 – Méthodologie pour le diésel avec Homer 155

ANNEXE 5 – Données entrées pour le photovoltaïque 165

ANNEXE 6 – Données entrées pour l'éolien 179

ANNEXE 7 – Données entrées pour le diésel 192

INTRODUCTION

Au Québec, bon nombre d'habitations se situent en territoire isolé ou à une distance significative du réseau électrique. Les coûts de raccordement au réseau sont importants et parfois, le raccordement est tout simplement impossible. C'est pourquoi les systèmes autonomes sont intéressants pour répondre aux besoins énergétiques des habitants de ces régions. L'utilisation de génératrices carburant aux énergies fossiles représente la situation générale actuelle malgré quelques avancées qui ont été faites en utilisant des systèmes hybrides avec une génératrice diésel et des éoliennes, il n'est reste pas moins que les systèmes utilisent beaucoup de carburant fossile. Les systèmes seuls, éolien ou photovoltaïque, nécessitent beaucoup d'accumulateurs pour pallier l'intermittence des gisements. Les systèmes hybrides autonomes avec des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes s'annoncent donc comme une solution limitant l'intermittence des ressources. Différentes combinaisons de systèmes sont analysées dans ce mémoire à la fois en situation hors réseau et connectée au réseau. Dans cette introduction sont exposés l'hypothèse principale et sa vérification, les questions de recherche, les objectifs généraux et spécifiques, l'originalité du projet et le contenu du mémoire.

Hypothèse principale. Je suppose que l'ajout d'un système photovoltaïque à un système éolien hors réseau au Québec permet de diminuer l'intermittence du système et donc, de diminuer la quantité d'accumulateurs nécessaires à la fiabilité du système ou de réduire la dimension des systèmes éolien et photovoltaïque installés. Cette diminution du nombre d'accumulateurs et de la taille des systèmes installés permet de réaliser des économies qui justifieraient le surcoût engendré par l'ajout du système photovoltaïque au système éolien.

Vérification de l'hypothèse principale. Ainsi, l'hypothèse sera réfutée si l'ajout d'un système photovoltaïque à un système éolien ne permet pas de réaliser des économies sur le système installé.

Questions de recherche. Voici les deux questions de recherche principales et une question secondaire :

- Est-ce qu'en région isolée au Québec, les systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques sont économiquement et techniquement viables en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls?

- Est-ce ce que ces mêmes systèmes sont viables en comparaison avec la situation actuelle génératrice diesel ou le réseau ?
- Quels logiciels sont reconnus et facilement accessibles (coût, facilité d'utilisation, champ d'application) pour réaliser de telles études ?

Objectifs généraux. Comparer des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec des systèmes photovoltaïque ou éolien seuls pour certains sites hors réseau au Québec et par rapport à d'autres sites ailleurs dans le monde. La comparaison avec la situation actuelle sera aussi effectuée (diesel et réseau). Pour ce faire, dans un premier temps, les systèmes seuls sont étudiés. Par la suite, différentes combinaisons de systèmes hybrides hors réseau sont analysées. Finalement, les différentes combinaisons de systèmes sont étudiées avec la situation connectée au réseau.

Tâches spécifiques. Les tâches spécifiques du projet sont les suivantes :

1. Identifier au moins deux logiciels nécessaires pour la réalisation du projet,
2. Sélectionner les sites pour l'étude (un au Québec, un avec gisement solaire élevé et un avec gisement éolien élevé),
3. Définir et modéliser les différentes composantes des systèmes à comparer,
4. Effectuer la comparaison en tenant compte du côté technique et économique,
5. Faire une analyse comparative entre les données fournies par les deux logiciels.

Originalité du projet. L'originalité du projet réside dans l'ajout d'un système photovoltaïque à un système éolien dans un contexte québécois et hors réseau. De plus, des méthodologies pour le dimensionnement des systèmes sont définies pour chacun des systèmes seuls avec le logiciel principal utilisé. Des exemples de calculs sont aussi fournis.

Contenu du mémoire. Tout d'abord, une revue de littérature est présentée; elle comprend une brève discussion sur l'avantage des systèmes hybrides, un état de la situation au Québec pour les habitations hors réseau et sur les technologies solaires, elle traite du manque de littérature sur le dimensionnement pratique des équipements des différents systèmes et finalement, elle intègre une courte étude mettant en relation les systèmes étudiés et le développement durable ainsi qu'une présentation de différentes analyses du cycle de vie environnementales réalisées au cours des dernières années. Viennent ensuite les chapitres présentant les logiciels, les méthodologies

pour le dimensionnement et les données utilisées pour l'étude. Le cœur du travail est exposé dans les sections traitant de la validation, de l'analyse et de la discussion des résultats dans les chapitres : validation des simulations et effet du gisement sur la consommation, étude comparative des systèmes seuls, hybrides autonomes et hybrides connectés au réseau et résultats généraux des analyses et des simulations. Finalement, la conclusion fait un retour sur les hypothèses, les objectifs et les questions de recherche.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature est séparée en trois chapitres : revue de littérature, présentation des logiciels et présentation des données. Dans cette section, il est question de la revue de littérature générale sur les systèmes d'énergies renouvelables hors réseau souvent couplés avec des génératrices diésel. L'avantage de l'utilisation des systèmes hybrides est discuté et la situation particulière du Québec est définie. Le manque de littérature pour le dimensionnement est aussi discuté et finalement, une analyse rapide des systèmes est faite selon le développement durable et l'analyse du cycle de vie. Bien que dans cette étude, il ne sera traité que des aspects techniques (dimensionnement) et économiques, j'ai cru bon de faire une brève recherche sur l'ensemble des aspects économique, social et environnemental, les deux derniers n'étant pas traités dans ce rapport étant donné que l'analyse de chacun de ces aspects est une étude complète en soit et nécessite des connaissances et compétences spécifiques à leur domaine pour être réalisée.

1.1 Les systèmes hybrides

L'énergie solaire et l'énergie éolienne sont des ressources intermittentes (Deshmukh & Deshmukh, 2008). Pour créer un système hors réseau fiable, ces systèmes éoliens ou photovoltaïques nécessitent une grande quantité d'accumulateurs (batteries) très coûteux (Ai, Yang, Shen, & Liao, 2003) et qui doivent généralement être remplacés avant la fin de vie des installations. L'installation des systèmes éoliens seuls ou photovoltaïques seuls engendre souvent un surdimensionnement des éoliennes ou de la surface photovoltaïque nécessaires (Tina, Gagliano, & Raiti, 2006) et ceci occasionne souvent des surcoûts inutiles.

De plus généralement, une installation photovoltaïque seule n'est pas rentable au Québec vu les conditions d'ensoleillement et les conditions climatiques. Ces conditions dépendent grandement de la localisation du site choisi. Cependant, les performances énergétiques des panneaux dépendent grandement des technologies utilisées. Certaines technologies sont sensibles à la lumière diffuse - cellules au silicium amorphe, cellules de Grätzel (*dye sensitized cells*) contrairement aux technologies cristallines qui sont très sensibles à l'angle d'incidence des rayons lumineux. Les technologies sensibles à la lumière diffuse offrent plus d'énergie par watt-crête (unité de référence normalisé pour les panneaux solaires) sans nécessiter un système actif d'orientation des panneaux. Ces panneaux offrent une bonne alternative aux pays nordiques.

De nombreux pays nordiques dont l'Allemagne et le Japon utilisent l'énergie photovoltaïque pour répondre à certains de leurs besoins en énergie et sont même des leaders dans le domaine. Bien que l'hiver l'apport en énergie soit réduit, l'été offre beaucoup d'énergie vu les longues journées d'ensoleillement (Ross & Royer, 1999). Il est donc intéressant de coupler cette source d'énergie avec l'énergie éolienne qui offre un apport important en hiver puisque statistiquement l'hiver les vents sont plus importants. Donc, selon le site, la combinaison de deux sources d'énergies intermittentes, notamment la combinaison du solaire photovoltaïque et de l'éolien qui sont des énergies complémentaires (Ekren & Ekren, 2008), permet de réduire la période qui est sans apport d'énergie (Celik, 2002) et cette combinaison permet ainsi de réduire la quantité d'accumulateurs nécessaire au système. Si les rendements du système hybride hors réseau sont bons, le surcoût occasionné par l'ajout d'un système photovoltaïque à un système éolien peut être compensé par les économies réalisées suite à la réduction du nombre d'accumulateurs nécessaires ou suite à la réduction du nombre d'éoliennes ou de panneaux solaires nécessaires.

De plus, les systèmes autonomes peuvent être justifiés lors de coûts élevés de raccordement au réseau électrique ou lorsque les coûts d'entretien du réseau seraient trop importants ou encore lorsque le raccordement est tout simplement impossible ou non souhaité. Les systèmes hybrides offrent une alternative verte aux génératrices qui s'alimentent au diesel pour répondre aux différents besoins des régions éloignées (Funabashi, Senjyu, Hayashi, Yona, & Urasaki, 2007).

Selon les articles écrits ces dernières années, on remarque que les projets sur les systèmes hybrides photovoltaïque et éolien hors réseau augmentent de façon notoire. Plusieurs d'entre eux ont lieu en Afrique - Algérie (Himri, Boudghene Stambouli, Draoui, & Himri, 2008) ou en Asie - Chine (Hongxing, Wei, & Chengzhi, 2008), en Australie (Dalton, Lockington, & Baldock, 2008) et en Europe - Grèce (Kaldellis, Kavadias, & Koronakis, 2007).

Aussi, de nombreux logiciels ont été développés (Ai et al., 2003) afin de modéliser et de dimensionner les systèmes d'énergies renouvelables. Il existe cependant très peu d'études qui portent sur des systèmes hybrides hors réseau en Amérique du Nord et encore moins pour le Québec.

1.2 Situation québécoise du photovoltaïque et des habitations isolées

1.2.1 Habitations en milieu isolé

Le territoire québécois est immense de nombreux endroits ne sont pas couverts par le réseau électrique d'Hydro-Québec. On estime à 40 000 habitations ou unités d'hébergement en milieu isolé (RNCREQ, 2009) pour lesquels l'approvisionnement en électricité se fait avec des génératrices à partir d'énergies fossiles soit propane, diésel ou mazout. L'utilisation de ces carburants a de nombreux désavantages, leur prix ne cesse de s'accroître étant donné que la ressource est portée à disparaître et les coûts de transport et d'entretien sont élevés. Ces carburants sont aussi une source de gaz à effet de serre, en plus de présenter des risques pour la sécurité, la santé publique ou pour les écosystèmes surtout lors de la manutention et du transport, mais aussi pendant leur utilisation (fuite de gaz, ventilation inadéquate, etc.).

1.2.2 Énergie fournie par les différentes technologies de panneaux solaires

Une étude faite par CanmetEnergy (Poissant) à Varennes apporte des conclusions intéressantes sur les différents types de panneaux solaires photovoltaïques utilisés et l'énergie fournie par watt-crête (W_c) installé de ces panneaux. Les panneaux étudiés sont : un au silicium cristallin de BP Solar, un au silicium cristallin de Sunpower, une triple-jonction de silicium amorphe de Unisolar et une hétérojonction de silicium de Sanyo. Sur une année complète, ils offrent pratiquement la même quantité d'énergie en Wh/W_c, ils fournissent respectivement : 1542 Wh/W_c, 1541 Wh/W_c, 1570 Wh/W_c et 1549 Wh/W_c. Seul le silicium amorphe offre un peu plus d'énergie que les autres puisqu'il est sensible au rayonnement diffus.

1.3 Dimensionnement

Il est difficile de trouver dans la littérature comment dimensionner les différents appareils pour les systèmes autonomes avec une approche pratique. La plupart des ouvrages portent sur la théorie de base des technologies, mais rarement sur le dimensionnement précis des équipements de base (panneaux solaires, éoliennes ou génératrices) et encore moins des appareils accessoires (banque de batteries, onduleurs, régulateurs). Les articles quant à eux ne fournissement pas ces informations, mais plutôt des informations très spécifiques sur l'étude réalisée. Peu de résultats concrets sont présentés puisque les informations fournies par les références ne sont pas

suffisantes afin bien mettre ces études en contexte et en faire une comparaison valide avec la présente étude.

1.3.1 Système photovoltaïque

Pour le système solaire photovoltaïque, un ouvrage incontournable est Énergie solaire photovoltaïque d'Anne Labouret (Labouret & Villoz, 2005). Les informations pour le dimensionnement sont précises et sont indiquées pour tous les équipements et appareils du système et des exemples sont fournis ce qui aide grandement à la compréhension. Les autres ouvrages portent beaucoup sur la base théorique des panneaux et leur constitution (Bernard, 2004). Un dernier livre intéressant est le livre canadien *Photovoltaics in Cold Climates* (Ross & Royer, 1999) qui présente des cas réels d'utilisation en pays nordiques.

1.3.2 Système éolien

La littérature pour les systèmes éoliens est surtout orientée vers les éoliennes de grandes puissances et les systèmes connectés au réseau (Rapin & Noël, 2010) (Fox, 2009) (Dubois, 2009). Elle est aussi très théorique et porte souvent sur le dimensionnement des pâles ou de l'éolienne elle-même à défaut de présenter comment dimensionner à partir d'équipements déjà existants et avec divers types et formats de données de gisement éolien (Mathew, 2006), (Le Gouriérès, 1980), (Cunty, 2001), (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009).

1.3.3 Système avec génératrice au diésel

La littérature pour les systèmes diésel au niveau du dimensionnement est déficiente. Heureusement que les différents manufacturiers de génératrice au diésel ont des pistes de dimensionnement sur leurs sites internet. Encore une fois, les ouvrages traitent plutôt de la conception des appareils au lieu du dimensionnement pour une application particulière.

1.3.4 Systèmes hybrides

Au niveau des systèmes hybrides, les ouvrages sont encore plus rares. Étant donné que peu existe pour les systèmes seuls, il est donc normal de trouver que la littérature pour les systèmes hybrides est encore plus mince. Le problème est le même que pour les systèmes seuls, le dimensionnement pratique n'est pas discuté dans les ouvrages (Patel, 2006).

1.4 Développement durable et analyses de cycle de vie

La prise de conscience de notre développement incontrôlé est de plus en plus forte. L'Homme devient sensible à son environnement physique et humain. Dorénavant, le développement se doit d'être responsable : la faisabilité technique et économique ne suffit plus à justifier les décisions. Une vision plus globale se développe est s'intègre aux décisions des gouvernements, des industriels et des consommateurs.

Pour être durable, le développement se doit d'englober les aspects économiques, environnementaux et sociaux, mais plus important encore est leur interaction ; ils doivent être intégrés simultanément. Le développement durable est à la fois viable, vivable et équitable comme le suggère la représentation, très fréquente (Cabral, 2007) (Jacquet & Tubiana, 2006), qui est faite du développement durable à la Figure 1.1.

La viabilité du développement regroupe les aspects environnementaux et économiques alors que la qualité d'être vivable intègre les concepts d'environnement et de société et finalement, le fait d'être équitable respecte l'économie et la société.

La difficulté du développement durable est de trouver l'harmonie entre ces trois pôles, tous les aspects sont d'égale importance, alors la solution idéale est difficilement atteignable.

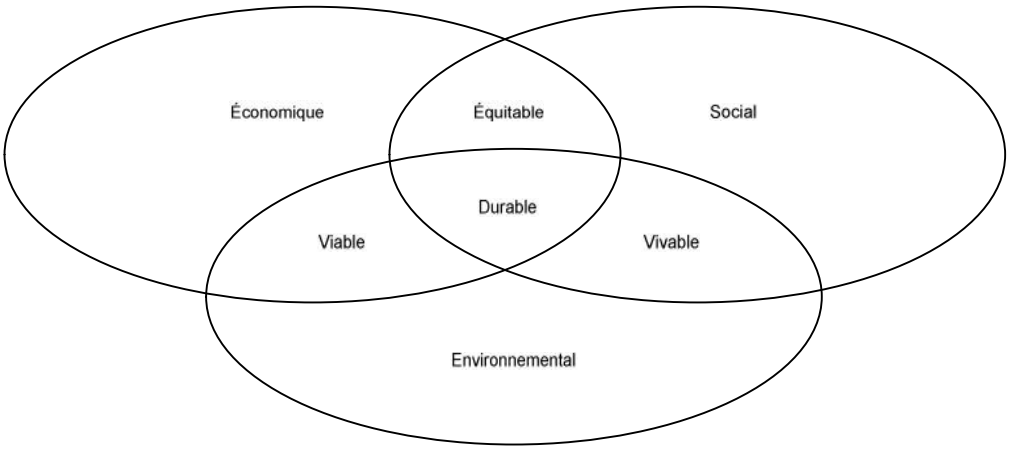


Figure 1.1 Schéma typique du développement durable

Certains décrivent l'aspect social comme l'objectif à atteindre (Cabral, 2007), l'environnement comme une contrainte due aux ressources limitées de notre planète et l'économie comme le moyen d'atteindre les objectifs.

1.4.1 ACV des systèmes seuls

Les analyses sur un seul système, comme l'analyse du cycle de vie d'une installation éolienne déterminée, présentent de nombreux avantages (Vestas Wind Systems A/S, 2006). Elles permettent de connaître les points faibles sur tout le cycle de vie. Ces points faibles peuvent être autant les étapes qui ont le plus d'impact pour une phase donnée ou les phases qui ont le plus d'impact sur tout le cycle de vie. En connaissant ces points faibles, il est facile de cerner les phases ou les étapes qui ont le plus besoin d'amélioration et d'ainsi améliorer le produit ou le service efficacement en mettant les efforts là où c'est nécessaire et payant. Par exemple, pour les éoliennes, la phase de production est très importante au niveau de tous les indicateurs environnementaux, il faut donc travailler à améliorer en priorité cet aspect. À l'opposé, la phase d'opération est négligeable pour tous les indicateurs, alors il n'est pas criant d'apporter des changements à cette phase. Suivant la même logique, il est inutile de faire des recherches pour améliorer la phase d'utilisation pour les systèmes photovoltaïques puisque leurs émissions sont pratiquement nulles, mais la phase de production nécessite énormément de travail puisqu'elle est très coûteuse en énergie et qui, la plupart du temps, n'est pas d'origines renouvelables.

1.4.2 ACV des différentes technologies

Les analyses peuvent aussi servir pour comparer les différentes technologies offertes, par exemple pour l'élaboration d'un système photovoltaïque, on peut choisir différentes technologies de panneaux solaires : panneaux utilisant des cellules de silicium amorphe ou de silicium cristallin ou encore utilisant les cellules à couches minces.

La production du silicium polycristallin est un exemple de processus très énergivore et mérite d'être amélioré. On utilise du silicium cristallin récupéré de la production de silicium pour l'électronique ou issu des mêmes procédés, cependant la pureté de ce silicium est inutilement élevée pour l'application photovoltaïque. De plus en plus, la demande face aux panneaux solaires justifie la production de silicium spécifique pour l'application photovoltaïque et de nombreux fabricants ont développé un silicium pour le domaine solaire qui a de plus gros grains et qui est

souvent nommé multicristallin afin d'être différencié du silicium polycristallin à grains fins connus dans l'électronique.

De plus, pour obtenir le même matériau, il est possible d'utiliser des techniques de fabrication différentes. Pour faire un choix éclairé sur ces technologies, il convient de les comparer dans des analyses de cycle de vie. Ces analyses permettent d'obtenir du financement pour la recherche pour les technologies qui offrent les meilleurs résultats et permettent aussi de prendre des décisions autant en industrie qu'au niveau politique pour favoriser l'une ou l'autre des technologies.

Des études ont été réalisées sur les différentes technologies de panneaux solaires. Certaines portaient principalement sur le recyclage et la disposition des modules à la fin de leur vie utile (Shibasaki, Warburg, & Eyerer, 2005; Urashima, Izumina, Arita, & Matsumoto, 2003) et d'autres sur l'analyse de cycle de vie en utilisant les nouvelles informations introduites sur les énergies photovoltaïques dans la banque de données Ecoinvent (Jungbluth, 2005; Jungbluth, Dones, & Frischknecht, 2008). Cette dernière étude est bien intéressante, mais elle présente des lacunes qui, selon moi, sont très importantes. Tout d'abord, les panneaux solaires sont très bien définis et modélisés pour l'étude et ce, même au niveau des attaches et des structures nécessaires aux panneaux, cependant les modules ne forment pas à eux seuls le système. Il doit y avoir aussi un convertisseur, un contrôleur et une banque de batteries. Le convertisseur est en partie modélisé dans l'étude, mais pas complètement alors que le contrôleur et les batteries sont totalement absents. À première vue, le contrôleur et le convertisseur n'ont probablement pas un impact très significatif, mais les batteries, elles ne sont pas négligeables. Les batteries les plus communes sont généralement au plomb. Si leur utilisation est peut-être sans danger ou sans impact important, leur disposition à la fin de leur vie utile représente un impact réel. De plus, cette étude utilise un score unique issu de l'analyse de cycle de vie aux fins de comparaison. Lors de l'analyse de l'impact, on obtient des résultats par catégories d'impact et on peut obtenir par la suite, des résultats par catégories de dommages. L'obtention des résultats par catégorie de dommages est faite à partir de modèles mathématiques de caractérisation et des mécanismes environnementaux. Ce sont des corrélations mathématiques et scientifiques qui conduisent à ces résultats. Le score unique est obtenu par une normalisation, un groupement et une pondération des résultats par catégories de dommages. Le groupement et la pondération sont faits en utilisant des jugements de valeur (par exemple, la santé humaine serait plus importante que les

changements climatiques), donc ce n'est plus une démarche scientifique et reproductible à mon avis. Selon moi, le score unique n'est pas nécessaire à la comparaison et peut même insérer un biais dans l'étude.

1.4.3 ACV des différentes sources d'énergie

La comparaison de systèmes utilisant différentes sources d'énergie est de plus en plus utilisée au niveau national pour connaître quel type d'énergie est le plus intéressant au niveau environnemental pour un pays ou pour une région donnée. Les besoins en énergie sont croissants et les problèmes environnementaux ne cessent aussi de s'accroître, il est donc important de trouver des sources d'énergies renouvelables ou qui causent le moins de dommages à l'environnement. Ces analyses sont très importantes puisqu'elles ont des répercussions à grande échelle. Il est aussi très important de trouver des solutions adaptées à la réalité de la région. Les solutions ne sont pas absolues et interchangeables, elles dépendent de nombreux paramètres propres à la région. Ces paramètres sont variés; ce peut être la disponibilité des ressources autant que l'acceptation sociale de la technologie. Par exemple, au Québec, les centrales nucléaires et les centrales thermiques au gaz naturel sont très mal perçues par le public alors qu'il est d'emblée plus favorable aux technologies comme les panneaux solaires et les éoliennes. Ces dernières technologies sont même encouragées par les gouvernements, par exemple la filière de l'éolien est favorisée au Québec pour complémenter l'hydroélectricité.

1.4.3.1 Analyse faite pour les énergies renouvelables entre elles et les énergies fossiles

La plupart des pays utilisent des énergies fossiles pour combler leurs besoins en énergie, le Québec et le Canada sont des exceptions notables vu leur très grande proportion d'utilisation d'énergies renouvelables notamment de l'hydroélectricité (Québec 97 % (Hydro-Québec) et Canada 59 % (Ressources naturelles Canada, 2006)). Depuis la prise de conscience des divers problèmes environnementaux et de la prise de conscience de la diminution des réserves d'énergies fossiles, les pays tendent à augmenter la proportion des énergies renouvelables pour la production d'électricité. Par exemple, la Pologne s'était donné des objectifs pour atteindre certaines proportions d'énergies renouvelables pour leur réseau comme 2,5 % en 2002 (objectif réussi) et de 7,5 % et 14 % pour l'année 2010 et 2020 respectivement (Goralczyk, 2003). Ces objectifs ont donné lieu à des nouvelles politiques et législations gouvernementales. Pour ce faire,

des analyses de cycle de vie sur les différentes options ont été réalisées. Afin de choisir les énergies les mieux adaptées pour le pays, des études environnementales et économiques permettent de trouver les solutions optimales, donc les solutions qui ont de bonnes performances : elles sont techniquement viables, elles coûtent moins cher et offrent de bons résultats environnementaux.

1.4.3.2 Analyse faite avec les systèmes connectés au réseau

La plupart des analyses de cycle de vie réalisées ont été faites pour des systèmes connectés au réseau. Parmi elles, une étude japonaise relate qu'au niveau des émissions de gaz à effet de serre évaluées sur tout le cycle de vie, toutes les énergies renouvelables offrent une meilleure performance, de plusieurs ordres de grandeur, que les énergies fossiles (Hondo, 2005). Seule l'énergie nucléaire parmi les énergies non renouvelables est en mesure d'offrir une performance similaire aux énergies renouvelables. Le pouvoir calorifique de ce combustible est énorme. De relativement petites quantités donnent énormément d'énergie. Même si les déchets sont dangereux, ils sont maîtrisés, donc on les entrepose simplement dans un milieu sécuritaire. Alors même s'ils sont hautement toxiques pour l'Homme, vu qu'il n'y a pas d'exposition à l'Homme ou à la nature, le nucléaire est très propre du point de vue de l'ACV. De la même façon, même si les panneaux solaires contiennent des matériaux toxiques, s'ils sont simplement enfouis sous forme de panneaux, on considère qu'ils ont un impact minime sur l'environnement puisque les produits toxiques n'interagissent pas avec la nature. De plus, le danger potentiel de l'utilisation de la centrale nucléaire n'est pas tenu en compte de la même façon que les dangers d'explosion du diesel ne sont pas gérés lors de l'utilisation des génératrices dans l'ACV. Dans le contexte japonais, l'hydroélectricité offre la meilleure performance, ensuite la géothermie et l'énergie éolienne suivent et finalement, l'énergie photovoltaïque offre la pire performance des énergies renouvelables. Selon cette étude, elle est même pire que l'énergie nucléaire pour ce qui est des gaz à effet de serre. Cependant, les technologies photovoltaïques font preuve de grands progrès. Dans le contexte québécois présent, le réseau est déjà alimenté majoritairement par une énergie renouvelable soit l'hydroélectricité. L'hydroélectricité est la meilleure solution parmi les énergies renouvelables si l'on tient compte des émissions de gaz à effet de serre (Hondo, 2005). Les autres types d'énergies renouvelables, comme l'éolien par exemple, ne sont que des systèmes complémentaires au réseau. Pour l'instant, il serait donc absurde de vouloir augmenter la

proportion des autres énergies renouvelables délivrées au réseau puisque le Québec détient déjà une solution très performante. Seules l'augmentation de la demande énergétique et l'utilisation de tout le potentiel hydroélectrique pourront éventuellement justifier l'ajout de nouveaux systèmes utilisant d'autres énergies. En bref, si les systèmes photovoltaïques, éoliens et hybrides ne sont pas pour les réseaux, ils pourront cependant améliorer la situation des systèmes hors réseau qui utilisent principalement des génératrices diesel.

Il y a une différence notable entre la situation des systèmes connectés au réseau et celle des systèmes hors réseau : la banque de batteries. Pour une situation connectée au réseau, l'intermittence de la source d'énergie éolienne ou photovoltaïque est absorbée par le réseau. Le réseau, normalement constitué de plusieurs sources distinctes d'énergie, utilisera simplement plus d'une autre source en cas d'arrêt d'approvisionnement de l'une d'entre elles. Par contre, pour un système hors réseau, il n'y a que l'énergie d'une source si c'est un système simple (éolien ou photovoltaïque) et de deux sources pour les systèmes hybrides (éolien et photovoltaïque). Vu l'intermittence de ces sources, il est nécessaire d'avoir des accumulateurs plus simplement appelés dans ce cas-ci, des banques de batteries. Elles permettent d'emmagasiner l'énergie excédentaire pour la réutiliser lors d'interruption d'approvisionnement en énergie. Pour un système simple, leur nombre est important et c'est pourquoi plusieurs proposent les systèmes hybrides qui diminuent les chances ou les moments d'interruption d'énergie et qui permettent ainsi d'utiliser moins de batteries. Les batteries sont le point faible des systèmes hors réseau, elles ont une durée de vie plus courte que le système et elles sont très sensibles à des températures très élevées et très basses, ce qui tend à diminuer de façon encore plus importante leur durée de vie.

1.4.3.3 Analyse des gros systèmes

En plus, qu'il existe une différence entre la situation hors réseau et la situation connectée au réseau, il existe aussi une différence entre les petits systèmes et les gros systèmes. Plusieurs petits systèmes de quelques dizaines de kilowatts peuvent être équivalents en apport d'énergie à un gros système de centaines de mégawatts, mais au niveau environnemental, les nombreux petits systèmes risquent d'être plus dommageables. Chacun des petits nécessite sont propre petit réseau donc contrôleur, convertisseur et banque de batteries. Le gros système utilise simplement plus efficacement tous ses éléments alors que les petits systèmes n'utilisent pas ses éléments à leur

pleine capacité. Il est parfois impossible de faire un réseau important en milieu isolé vu les distances à couvrir pour relier les gens ou les divers besoins.

Une étude récente faite en 2006 compare différentes technologies pour de très gros systèmes (Ito, Kato, Komoto, Kichimi, & Kurokawa, 2008). Les conclusions sont intéressantes et très bien formulées cependant elles étudient seulement le coût, l'énergie utilisée et les émissions de CO_2 émises sur tout le cycle de vie comme paramètres de comparaison. Il est cependant difficile à dire si l'étude portait sur la situation hors réseau ou connectée au réseau et quels éléments avaient été modélisés. Cette étude semble simplement tenir compte des modules nécessaires pour répondre aux besoins sans tenir compte du système complet. De plus, les conclusions pour un gros système ne peuvent pas s'appliquer pour un petit système puisqu'ils n'utilisent pas exactement les mêmes technologies pour leurs composantes puisque les capacités diffèrent.

1.4.4 Aspects communs entre les différentes études

1.4.4.1 Évolutions des technologies

Étant donné le progrès rapide des technologies photovoltaïques dans les dernières années, de nombreuses études dénoncent les résultats d'anciennes études faites avec des données qui sont maintenant dépassées (Jungbluth et al., 2008). Dans ces études, l'énergie photovoltaïque n'offrait pas d'aussi bons rendements qu'aujourd'hui. De nouvelles informations sont maintenant disponibles dans les banques de données (Jungbluth, 2005; Jungbluth et al., 2008) . De plus, de nombreux projets sont en cours ou ont eu cours comme le projet SENSE, *Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems* (Shibasaki et al., 2005), pour améliorer les banques de données et trouver les informations utiles manquantes. Ces projets ont donné lieu à des collaborations entre groupes de divers milieux : industriels, instituts et écoles scientifiques et des consultants. Fthenakis (Fthenakis, Alsema, & De Wild-Scholten, 2005) a même recensé les données qui étaient jugées nécessaires et manquantes.

1.4.4.2 Coûts des dangers environnementaux potentiels

Dans plusieurs articles, il est mention que le photovoltaïque ou même l'éolien sont des énergies plus chères donc, c'est un frein à leur expansion. Plusieurs de ces articles informent que les coûts reliés aux dangers potentiels ne sont pas chiffrés. Le cas évident est l'utilisation de l'énergie

nucléaire. Cette énergie est relativement bon marché et est aussi propre au point de vue des émissions de gaz à effet de serre que les énergies renouvelables qui sont beaucoup plus coûteuses. Les dangers potentiels ne sont pas tenus en compte dans les calculs de coûts (Kannan, Leong, Osman, Ho, & Tso, 2006). Par exemple, l'éolienne est beaucoup moins dangereuse que la centrale nucléaire ou même que les déchets nucléaires, mais ces dangers potentiels n'ont pas encore été véritablement chiffrés. Il est donc important d'analyser non seulement les coûts, mais aussi les analyses sur l'environnement et la société. Tout ne se chiffre pas ou n'est pas encore modélisé.

1.4.4.3 Analyse de sensibilité

Plusieurs dénotent l'importance d'une analyse de sensibilité des différents paramètres (Ito et al., 2008). En tenant compte de l'incertitude et de la variabilité sur les différents paramètres, on peut savoir si les conclusions tiennent toujours.

1.4.5 Conclusions générales des ACV

En résumé, aucune étude n'a été faite pour les systèmes hybrides, ni pour les systèmes hors réseau, ni pour le Québec. Les nouvelles informations sur les systèmes photovoltaïques dans les bases de données peuvent être très utiles pour toute nouvelle étude d'analyse de cycle de vie qui contient un système photovoltaïque. Il est cependant important d'utiliser tout le système ce qui inclut les panneaux solaires, les batteries, le convertisseur et le contrôleur pour arriver à des conclusions justes pour les systèmes réels implantés. Pour les mêmes raisons, il est important de regarder tous les résultats sur tous les plans de l'analyse du cycle de vie donc une analyse des résultats par catégories d'impacts et une analyse des résultats par catégorie de dommages sont justifiables. Pour une solution globalement performante pour l'environnement, il ne faut pas seulement analyser les gaz à effet de serre seulement comme dans (Hondo, 2005) ou utiliser simplement un indice comme le EPT comme dans (Jungbluth et al., 2008). En général, dans les études consultées pour ce projet, peu se basent sur l'ensemble des conclusions qu'une analyse de cycle de vie puisse apporter. En utilisant que certains indicateurs, on perd toute la puissance de l'analyse du cycle de vie qui peut dresser le portrait global de la situation. Aussi, certaines études ont négligé certaines composantes du système. Le manque de données n'est pas une excuse pour négliger une composante, l'approche par approximation peut être une solution très efficace qui

peut ensuite être suivie par une analyse de sensibilité. De façon générale, l'analyse de sensibilité permet de renforcer ou d'infirmer les conclusions faites.

1.4.6 Analyse économique

L'analyse économique passe bien sûr par le calcul des coûts du projet et sa rentabilité. Divers indices comme l'EPT peuvent être utilisés. Cet indicateur est le moment auquel la source d'énergie devient rentable au niveau énergétique, c'est-à-dire que l'énergie fournie par la source couvre les dépenses énergétiques pour l'implantation de cette source. Les options utilisant des énergies renouvelables peuvent être comparées à d'autres options comme l'option existante (les génératrices) ou l'option commune de la région, province ou du pays (se connecter au réseau). Dans le cas présent, s'il y a possibilité de raccordement au réseau, il faudrait estimer les coûts associés versus les coûts des options des technologies renouvelables. S'il n'y a pas possibilité de raccordement au réseau, diverses possibilités sont disponibles : utiliser un système avec génératrice ou un système d'énergies renouvelables pour chaque maison ou besoin précis (environ 5 kW – 10 kW) ou faire un réseau alimenté par des énergies renouvelables pour un groupement des maisons ou de besoins, mais qui serait de plus grande capacité (environ 50 kW).

Ensuite, une analyse plus globale peut être faite pour les technologies afin de savoir si elles sont de bons stimulants économiques. Si le domaine est en essor et permet de créer des emplois, les technologies deviennent intéressantes. De plus, si la région présente des avantages face à d'autres pour l'implantation cette technologie, les gouvernements veulent attirer cette industrie. Par exemple au Québec, l'électricité est abondante et peu coûteuse, alors les industries qui nécessitent beaucoup d'électricité sont très attirées par la région. C'est le cas de l'industrie de l'aluminium et cet avantage du Québec pourrait aussi être intéressant pour l'industrie photovoltaïque pour laquelle de nombreux procédés nécessitent une quantité importante d'énergie (notamment la production de *wafer* – tranche de semi-conducteur).

Plusieurs gouvernements offrent des incitatifs pour l'utilisation des technologies renouvelables ou pour des mesures d'efficacité énergétique. Au Québec, il existe une subvention pour l'installation d'un système de géothermie offerte par Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2009). D'autres subventions existent pour les particuliers voulant faire des rénovations pour améliorer l'efficacité énergétique ou faire l'ajout de nouvelles technologies d'énergies renouvelables

(programme Rénoclimat de l'Agence de l'efficacité énergétique du Québec et programme écoÉNERGIE Rénovation de Ressources naturelles Canada) (Hydro-Québec, 2009).

1.4.7 Analyse de l'aspect social

L'aspect social est de façon générale l'amélioration de la condition humaine par la satisfaction des besoins essentiels et l'amélioration de la qualité de vie. Ceci intègre les principes généraux d'accès à l'emploi, à l'éducation, aux soins médicaux, aux services sociaux et à un logement de qualité.

Dans de nombreux pays en voie de développement ou sous-développés, les systèmes hybrides ou photovoltaïques sont utilisés pour la désalinisation de l'eau de mer pour offrir de l'eau potable ou encore pour réfrigérer les médicaments ou alimenter les équipements médicaux dans les cliniques des régions isolées. L'utilisation de l'énergie solaire pour ce genre de besoins est essentielle à l'amélioration de la qualité de vie des gens de ces régions. De plus, l'ajout de systèmes éoliens aux systèmes photovoltaïques permet d'offrir une sécurité pour un apport en énergie continue. Pour les cliniques, par exemple, souvent le système photovoltaïque ou hybride est couplé à une génératrice puisqu'on ne peut pas permettre une défaillance du système et se retrouver sans apport d'énergie.

De plus, plusieurs villages reculés du monde installent ou font des projets d'installations d'énergies renouvelables. Ces installations peuvent simplement être utilisées pour pomper ou chauffer de l'eau ou encore apporter un besoin minimal en énergie par exemple dans les écoles ou centres communautaires.

L'aspect social peut aussi se traduire par la responsabilité sociétale de l'entreprise. Ceci se traduit par les bonnes conditions de leurs employés, le respect des communautés environnantes et du territoire. L'employeur doit offrir de bonnes conditions de travail (santé et sécurité, hygiène et propreté des lieux) et aussi leur donner de la formation nécessaire (Rosa, Delchet, & Aubrun-Vadrot, 2005).

CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DES LOGICIELS

2.1 Survol des différents logiciels

Étant donné les différents efforts des dernières années à travers le monde pour diminuer la dépendance au pétrole, beaucoup de ressources ont été mises de l'avant pour développer les énergies renouvelables et principalement, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque. Ces énergies sont en forte croissance partout à travers le monde. Les outils comme les logiciels font partie des grandes réalisations concernant ces énergies à promouvoir. De nombreux logiciels existent maintenant pour modéliser, optimiser ou dimensionner les différents systèmes conçus à partir d'énergie renouvelable. Beaucoup de ces logiciels sont spécialisés pour un type d'énergie particulier. Il en existe un bon nombre pour le solaire photovoltaïque ainsi que pour l'énergie éolienne. Les logiciels qui font référence à plusieurs sources d'énergie sont, quant à eux, plus rares.(CanmetÉnergie)

2.1.1 Logiciels pour le photovoltaïque

Les technologies des panneaux solaires photovoltaïques ont beaucoup évolué et ces outils aussi. Il existe des logiciels pour la simulation (TRNSYS, INSEL, HOMER, PV-DesignPro), d'autres pour l'évaluation des coûts et des différentes données économiques (SOLinvest, RETScreen) ou pour l'analyse et la planification des systèmes (PV F-Chart, Laplace System, PV*SOL, PVcad, PVSYST, PV Professionnal, Kerychip, Tetti FV), certains sont destinés à l'industrie (APOS Photovoltaic Statlab, PV Cost Simulation Tool), certains sont développés pour la surveillance et le contrôle des systèmes installés (Meteocontrol, SPYCE) ou encore pour l'évaluation de site (ECOTECT, Shadow Analyzer, Shadows, GOSOL, METEONORM, Horizon, Sombrero) et finalement, il existe des outils disponibles en ligne, facilement accessibles à tous (Solardesigntool, PV Potential Estimation Utility, Logiciel CalSol, Panel Shading). (Energy, 2011)

Certains de ces logiciels ne font appel qu'à un sous-domaine du solaire photovoltaïque comme les panneaux intégrés aux immeubles ou d'autres sont utiles seulement pour les systèmes connectés au réseau par exemple. Il existe maintenant tout un monde de logiciels. Il est donc important de définir ses besoins pour identifier facilement les logiciels utiles.

De plus, plusieurs des logiciels faisant référence à l'énergie solaire photovoltaïque sont dans une seule langue (français, anglais, italien) et beaucoup sont d'origine allemande et en allemand uniquement, ce qui les rend plutôt inaccessibles.

2.1.2 Logiciels pour l'éolien

Comme pour le solaire photovoltaïque, il existe maintenant un bon nombre de logiciels pour les éoliennes. Certains logiciels sont pour l'analyse de fermes éoliennes (WindFarm, OpenWind, GH WindFarmer, WindSim), d'autres pour l'analyse des données de gisement éolien (Windographer,) ou simplement pour le design d'éolienne (Focus 6, GH Bladed) ou encore pour l'évaluation de sites (windNavigator). Il en existe aussi pour l'optimisation des systèmes HOMER, le calcul des coûts et autres données économiques RETScreen ou pour la surveillance des systèmes installés (suite de logiciels par ETAP) ou encore pour le design et la planification de projets éoliens dans leur ensemble (WindPro).

2.1.3 Logiciels pour les énergies renouvelables

Il est intéressant de pouvoir comparer différents systèmes simples et des systèmes hybrides à l'aide d'un seul et même logiciel. De nombreux logiciels concernent les énergies renouvelables utilisées spécifiquement pour les bâtiments et les maisons et même plus précisément sur l'efficacité énergétique de ces bâtiments. Peu de logiciels traitent de la production d'énergie en intégrant plusieurs types d'énergie. En intégrant à la fois les outils de simulation et les outils de calculs des coûts, voici les quelques logiciels disponibles : In my backyard, EnergyPeriscope, Hybrid2, HOMER et RETScreen. Ces logiciels seront discutés dans une section ultérieure.

2.2 Paramètres pour le choix des logiciels

Afin de choisir les logiciels, il est indispensable de définir les besoins, donc de déterminer les attentes minimales auxquelles le logiciel doit répondre. Les logiciels devront avoir ces paramètres afin d'être sélectionnés :

1- Langue : anglais ou français,

2- Accessibilité à tous,

   - Prix : gratuit ou moins de 100 $ par licence,

- Facilement disponible : par Internet,
- Simplicité d'utilisation,
- Documentation en ligne,

3- Plusieurs technologies disponibles : photovoltaïque, diesel et éolien,

4- Systèmes hors réseau,

5- Simulation de systèmes dans plusieurs pays,

6- Évaluation des coûts,

7- Optimisation des systèmes.

2.2.1 Langue

Pour des raisons évidentes de compréhension, le logiciel doit être en français ou en anglais.

2.2.2 Accessibilité à tous

L'accessibilité à tous est un point important selon moi. Afin de promouvoir les énergies renouvelables, le public doit pouvoir les comprendre et utiliser des outils qui rendront faisables leurs projets. Il faut qu'ils soient à la fois assez performants pour les scientifiques et chercheurs et relativement simples pour que même les non initiés soient capables de les utiliser.

Il est donc primordial que le logiciel soit disponible pour le système d'exploitation Windows qui est majoritairement utilisé et qu'il ne requière pas des puissances de calculs excessives. D'emblée, la plupart des logiciels ont ces caractéristiques de base.

2.2.2.1 Prix

Les pays industrialisés ont généralement beaucoup de financement pour la recherche, ce qui n'est pas le cas de tous les pays. Si un minimum de ressources financières est utilisé pour les logiciels, ce sont des ressources qui peuvent être dépensées ailleurs comme dans la réalisation de projets concrets. La gratuité ou le faible coût des logiciels (moins de 100 $ par licence, par exemple) rendent la recherche et la réalisation de projets accessibles à tous les pays et à toute la société. De plus, cela facilite aussi l'apprentissage des étudiants qui peuvent faire des projets scolaires plus appliqués, plus concrets sans même que leurs institutions déboursent des sommes considérables,

souvent plusieurs milliers de dollars par licence, pour des logiciels qui offrent des possibilités similaires. Dans le cas d'une étude macroscopique, si un logiciel peut obtenir des résultats similaires à la réalité à une fraction du prix, je considère que cette incertitude est tolérable.

2.2.2.2 Facilement disponible

La disponibilité du logiciel sur Internet est un fort atout pour l'accessibilité à tous. Peu importe l'endroit dans le monde, dès qu'on a accès à une connexion Internet, le logiciel peut être téléchargé.

2.2.2.3 Simplicité d'utilisation

La simplicité d'utilisation est importante puisqu'elle rend à la fois le logiciel accessible aux non-initiés et permet de gagner un temps non négligeable aux scientifiques et chercheurs qui n'ont pas à apprendre un langage de programmation pour l'utiliser et qui peuvent réaliser des simulations rapidement. De cette façon, on peut assurer une certaine pérennité des études faites puisqu'elles peuvent être réalisées par une majorité d'étudiants et de chercheurs.

2.2.2.4 Documentation disponible

Bien entendu, la disponibilité de la documentation en ligne est essentielle. L'accessibilité à un tutoriel et à l'aide du logiciel est primordiale. Le tutoriel permet à tous de pouvoir utiliser le logiciel sans aucune formation préalable. L'aide du logiciel quant à elle permet d'obtenir des précisions sur les différentes données à fournir et le fonctionnement global du logiciel. La possibilité de retour et commentaires par le support technique sur les fichiers produits ou de l'assistance par Internet ou encore des fichiers d'exemple disponibles sont des atouts.

2.2.3 Plusieurs technologies disponibles

Vu le sujet de l'étude, le logiciel doit supporter au minimum la simulation pour la production des énergies suivantes : le solaire photovoltaïque, le diesel et l'éolien. Il doit aussi permettre la simulation de systèmes hybrides soit éolien-photovoltaïque, éolien-diesel, photovoltaïque-diesel et finalement éolien-photovoltaïque-diesel.

2.2.4 Systèmes hors réseau

Beaucoup de logiciels supportent la simulation de systèmes connectés au réseau, mais peu d'entre eux permettent la simulation de systèmes hors réseau, qui est le sujet de cette étude.

2.2.5 Simulation de systèmes dans plusieurs pays

Dans le cadre du présent projet, la simulation doit pouvoir être faite au minimum pour le Québec et aux fins de comparaisons, dans d'autres pays, notamment des pays avec plus d'ensoleillement que le Québec (les pays au niveau de l'équateur) ou développant beaucoup la filiale du solaire photovoltaïque (Allemagne et Japon, par exemple) et des pays reconnus pour leur gisement éolien significatif (Danemark).

2.2.6 Évaluation des coûts

La simulation doit pouvoir offrir une estimation des coûts du système. Cette évaluation pourra être validée par un second logiciel.

2.2.7 Optimisation des systèmes

L'optimisation des systèmes est très intéressante, surtout pour les systèmes hybrides puisque le logiciel offre des solutions plus performantes que ce que les calculs élémentaires offriraient. Malheureusement, ce paramètre n'est pas disponible pour tous les logiciels.

2.3 Logiciels choisis

Voici une brève discussion sur les logiciels concernant les énergies renouvelables (In my backyard, EnergyPeriscope, Hybrid2, HOMER et RETScreen).

In my backyard est développé par NREL (National Renewable Energy Laboratory) des États-Unis. Il permet un calcul sommaire des possibilités pour un petit projet éolien ou photovoltaïque pour son domicile. Il fait appel au logiciel PVWatts aussi développé par ce laboratoire. Il ne permet pas de faire des systèmes hybrides et a été développé pour les États-Unis principalement. Les paramètres sont détaillés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Paramètres pour le choix des logiciels – In my backyard

Paramètres	**Oui / Non / En partie**	**Explications**
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	Oui	Disponible en ligne
Plusieurs technologies disponibles	En partie	Systèmes hybrides non disponibles et pas de système diesel disponible
Systèmes hors réseau	Non spécifié	---
Simulation de systèmes dans plusieurs pays	En partie	Le logiciel est conçu pour les États-Unis, donc les calculs de coûts sont adaptés à cette réalité.
Évaluation des coûts	Oui	Analyse sommaire, on n'a pas accès à entrer des données spécifiques.
Optimisation des systèmes	Non	---

EnergyPeriscope (Tableau 2.2) est plutôt orienté pour les entreprises. Il est possible d'entrer des coûts de réelles soumissions et aide à optimiser les investissements faits. Pour avoir accès à ce logiciel, il y a des coûts mensuels à défrayer. Le logiciel fait appel aux algorithmes utilisés par PVWatts et RETScreen. Il est aussi lié avec les bases de données de la NASA et de TMY-Typical Meteorological Year pour les données de gisements solaires et éoliens.

Tableau 2.2 Paramètres pour le choix des logiciels – EnergyPeriscope

Paramètres	**Oui / Non / En partie**	**Explications**
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	Non	Coût : Frais mensuels Logiciel orienté pour les projets en entreprises.
Plusieurs technologies disponibles	En partie	Solaire photovoltaïque et éolien, disponibles diesel - non systèmes hybrides – non spécifié
Systèmes hors réseau	Non spécifié	---
Simulation de systèmes dans plusieurs pays	En partie	Canada et États-Unis, oui Autres pays, non spécifié
Évaluation des coûts	Oui	---
Optimisation des systèmes	Oui	Oui, mais en fonction de l'entreprise

Hybrid2 (Tableau 2.3) est à la fois développé par NREL et RERL (Renewable Energy Research Laboratory) de l'université du Massachussetts. Pour avoir accès à la version de démonstration, on doit faire une demande de mot de passe et on doit faire la demande, à l'un ou l'autre des laboratoires, pour obtenir la version complète.

Tableau 2.3 Paramètres pour le choix de logiciels – Hybrid2

Paramètres	**Oui / Non / En partie**	**Explications**
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	En partie	Une demande doit être faite. Le téléchargement n'est pas directement disponible.
Plusieurs technologies disponibles	Oui	---
Systèmes hors réseau	Non spécifié	---
Simulation de systèmes dans plusieurs pays	Non spécifié	---
Évaluation des coûts	Oui	---
Optimisation des systèmes	Non spécifié	---

En explorant plus attentivement ces logiciels, on remarque qu'il ne reste que les logiciels HOMER (Tableau 2.4) et RETScreen (Tableau 2.5) qui répondent à la majorité des paramètres souhaités. RETScreen ne permet pas l'optimisation des systèmes, il offre plutôt une analyse détaillée des coûts. Le logiciel de base pour les simulations sera donc HOMER. RETScreen sera utilisé pour comparer les coûts. Ces logiciels sont aussi reconnus par beaucoup d'associations ou d'agences en énergie ainsi que de nombreux sites gouvernementaux. Ils sont aussi utilisés par des dizaines de milliers d'utilisateurs dans des centaines de pays.

Tableau 2.4 Paramètres pour le choix des logiciels – HOMER

Paramètres	**Oui / Non / En partie**	**Explications**
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	Oui	Gratuit, téléchargement disponible en ligne, aide et tutoriel, fichiers d'exemple disponibles en ligne.
Plusieurs technologies disponibles	Oui	Éolien, diesel et photovoltaïque
Systèmes hors réseau	Oui	---
Simulation de systèmes dans plusieurs pays	Oui	Partout à travers le monde, à partir de coordonnées (longitude et latitude)
Évaluation des coûts	Oui	---
Optimisation des systèmes	Oui	Il donne la meilleure solution parmi une sélection de systèmes.

Tableau 2.5 Paramètres pour le choix des logiciels – RETScreen

Paramètres	**Oui / Non / En partie**	**Explications**
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	Oui	Gratuit, téléchargement disponible en ligne, aide et tutoriel, fichiers d'exemple disponibles en ligne.
Plusieurs technologies disponibles	Oui	Éolien, diesel et photovoltaïque
Systèmes hors réseau	Oui	---
Simulation de systèmes dans plusieurs pays	Oui	Partout à travers le monde selon des lieux prédéterminés.
Évaluation des coûts	Oui	---
Optimisation des systèmes	Non	---

2.4 Présentation de HOMER

Homer est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile. La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory), il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. La version utilisée pour le présent projet est HOMER 2.68 beta sortie en juillet 2009. Depuis, il y a eu 2 nouvelles versions disponibles pour 2.75 et 2.76 qui sont maintenant vendues pour un faible coût 99 $US pour les nouveaux utilisateurs et pour 49 $US pour les anciens utilisateurs. La

version 2.68 beta est toujours disponible gratuitement. Ce logiciel est largement utilisé dans plus de 190 pays et par plus de 40 000 utilisateurs.

2.4.1 Principales caractéristiques

Tout d'abord, ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. Voici, Figure 2.1, le modèle conceptuel de HOMER.

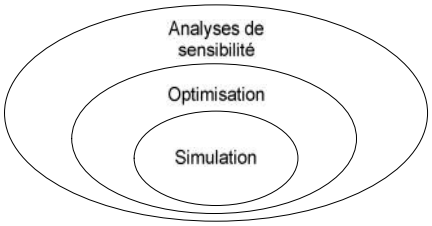


Figure 2.1 Modèle conceptuel de HOMER

Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation.

Le logiciel permet de faire des simulations avec différents systèmes de production d'énergie :

- panneaux solaires photovoltaïque,
- éoliennes,
- barrage hydroélectrique au fil de l'eau,
- biomasse,

- génératrices (diesel, essence, biogaz, combustibles alternatifs et combustibles personnalisés, co-alimentée),
- réseau électrique,
- microturbines,
- piles à combustible.

Homer offre aussi une vaste gamme de dispositifs d'accumulation ou de récupération d'énergie :

- banque de batteries,
- volants d'inertie (*flywheels*),
- *flow batteries*,
- hydrogène.

On peut aussi entrer divers types de besoins énergétiques :

- profils de consommation journaliers avec des variations selon les saisons,
- charge différée pour le pompage d'eau ou pour la réfrigération,
- charge thermique,
- mesures d'efficacité énergétique.

Homer peut donc simuler un large éventail de systèmes différents en plus de toutes les combinaisons possibles de systèmes hybrides.

2.4.2 Interfaces

Le logiciel HOMER est facile à utiliser et son interface est similaire aux logiciels usuels, il est donc muni d'un menu dans le haut ainsi que des icônes que l'on peut utiliser sans aller dans les menus. On peut considérer que l'interface d'HOMER a trois zones importantes comme indiqué sur la Figure 2.2 : la zone de définition du système, celle des ressources et celle des résultats.

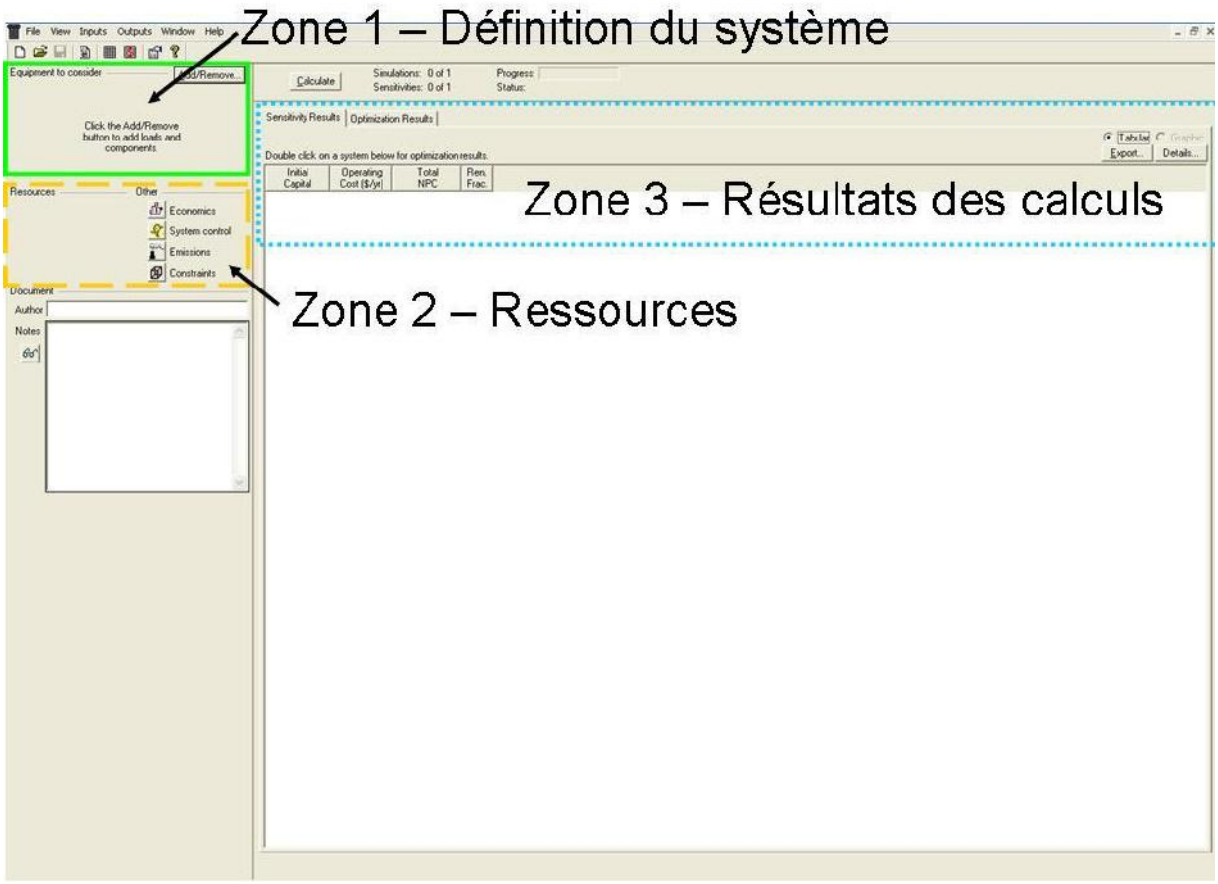


Figure 2.2 Interface HOMER – Fichier vierge

La zone de définition du système permet de choisir les équipements qui seront inclus dans le système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments à utiliser selon les choix illustrés à la Figure 2.3. De plus, dans cette même fenêtre, il est possible de choisir : de modéliser le réseau électrique, d'en faire la comparaison avec un système hors réseau ou simplement de ne pas modéliser le réseau.

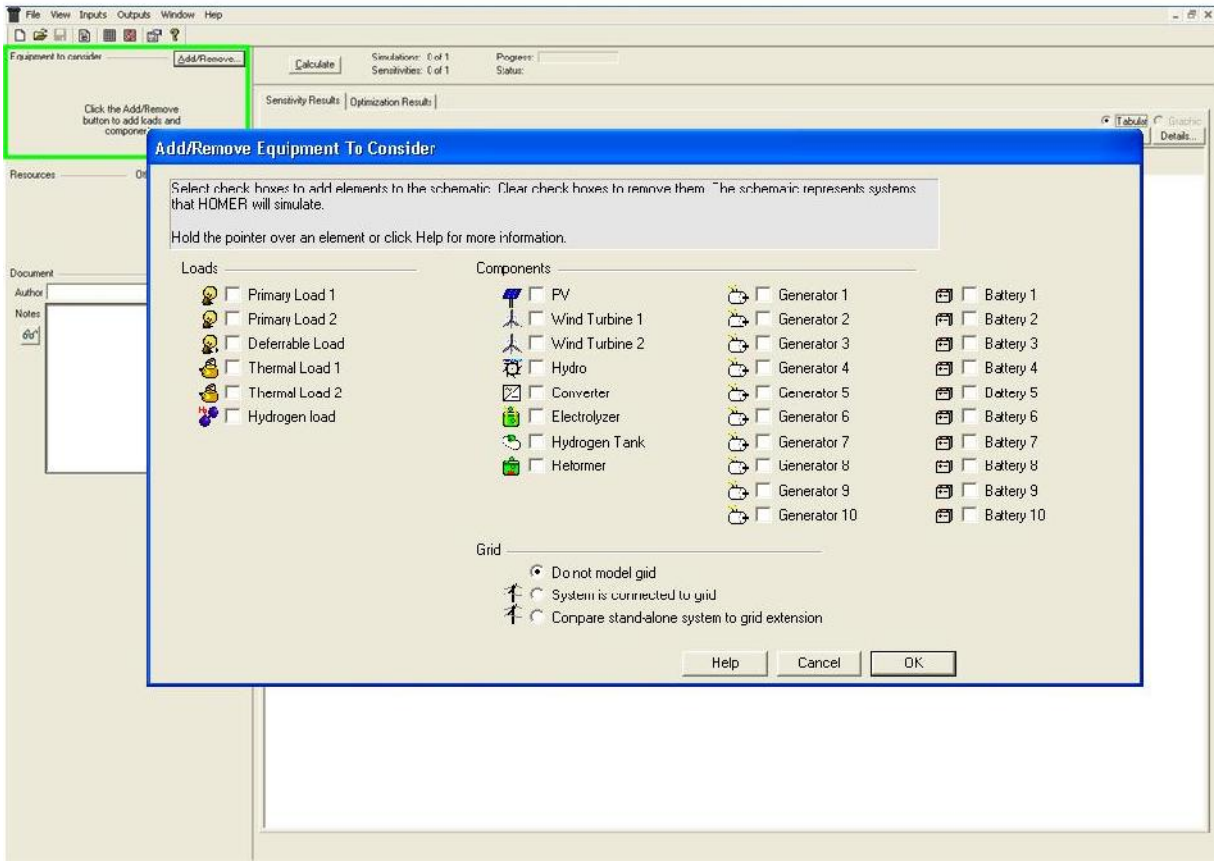


Figure 2.3 Interface HOMER – Équipements à ajouter

Une fois sélectionnés, les divers équipements apparaissent dans la zone 1 de définition du système comme à la Figure 2.4 et les ressources nécessaires aux équipements sélectionnés apparaissent, elles, dans la zone 2 de définition des ressources comme à la Figure 2.5.

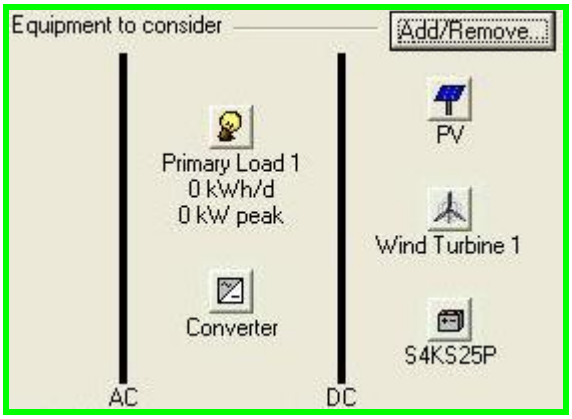


Figure 2.4 Interface HOMER – Équipements sélectionnés

Figure 2.5 Interface HOMER – Ressources

Dans ces deux zones, pour chaque icône, il y a une fenêtre à remplir ; ce sont les données à fournir pour faire une simulation. Les données entrées pour le présent projet seront définies dans la 4. Une fois les données entrées, on peut faire calculer HOMER, en cliquant sur l'icône comme illustré dans la Figure 2.6.

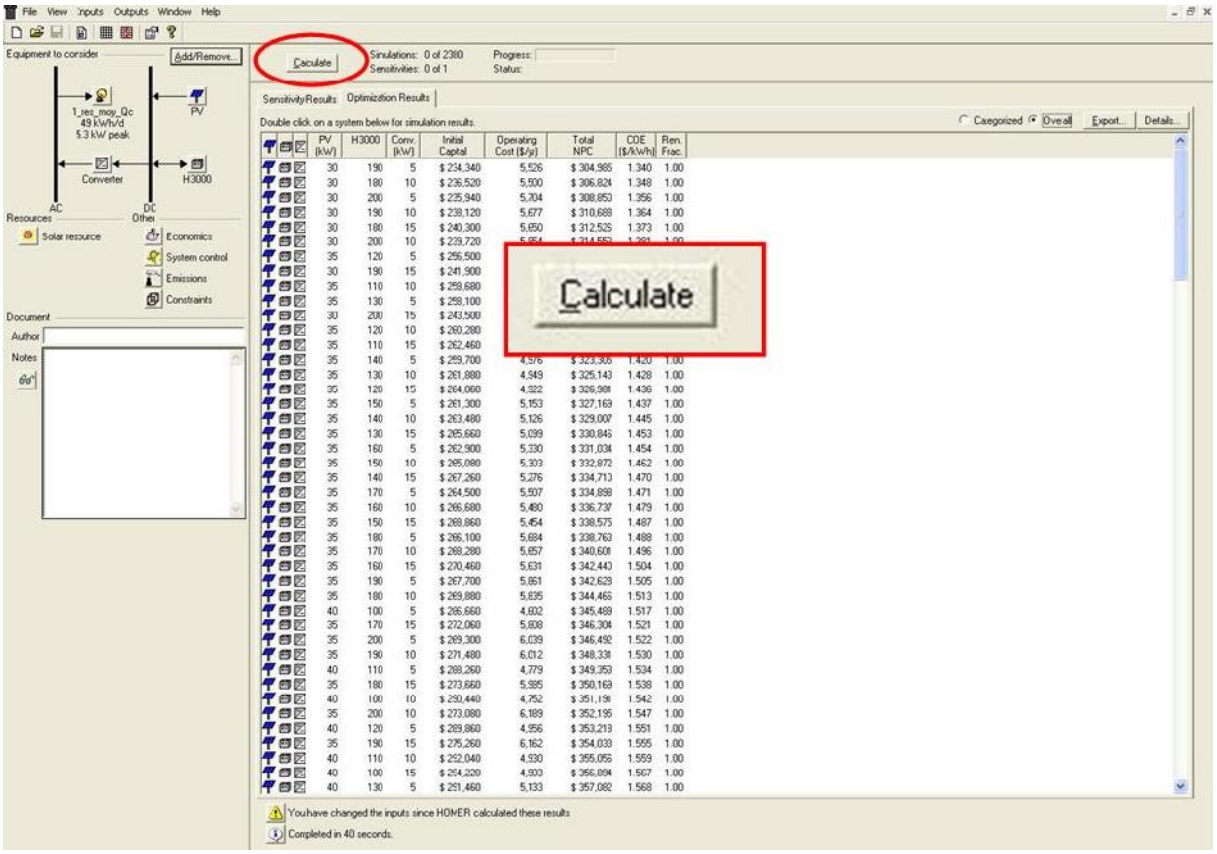


Figure 2.6 Interface HOMER – Fichier complété

Lorsque le calcul est complété, les résultats apparaissent et la solution la plus économique est la première comme illustré à la Figure 2.7. Un résumé du système et des coûts reliés sont affichés dans la zone des résultats.

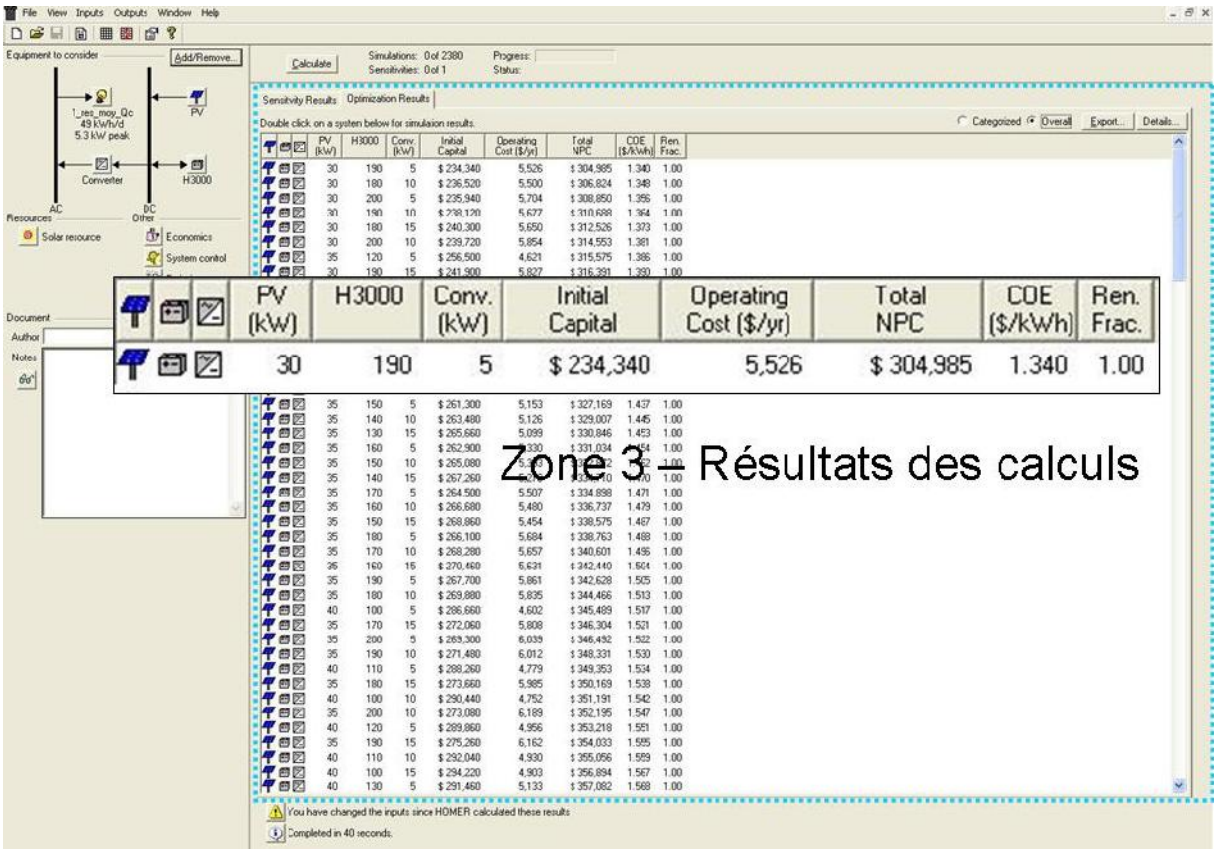


Figure 2.7 Interface HOMER – Résultats des calculs

2.4.3 Données à entrer

En bref, les données à entrer sont celles reliées aux zones 1 et 2 de HOMER. Il s'agit de données reliées à la consommation énergétique, aux équipements (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, génératrices, onduleur, batteries ou autres équipements) et aux ressources nécessaires comme les données de gisement solaire ou éolien, aussi bien que les données reliées au combustible utilisé par la génératrice. Dans la zone 2 des ressources, il y a aussi certains paramètres économiques que l'on peut modifier. D'autres paramètres permettent un différent contrôle du système (surtout au niveau de la simulation des banques de batteries et des génératrices). Dans la zone des ressources, on peut aussi mettre des pénalités monétaires pour les émissions émises ou bien un seuil limite d'émissions à ne pas dépasser lorsque la simulation sera effectuée. Finalement, certaines contraintes peuvent être exigées comme une fraction minimale d'énergie renouvelable à avoir dans le système ou encore accepter un certain pourcentage de

déficit en énergie. Une fois toutes les sections remplies, Figure 2.8, on peut lancer la simulation en cliquant sur l'icône « calculer ».

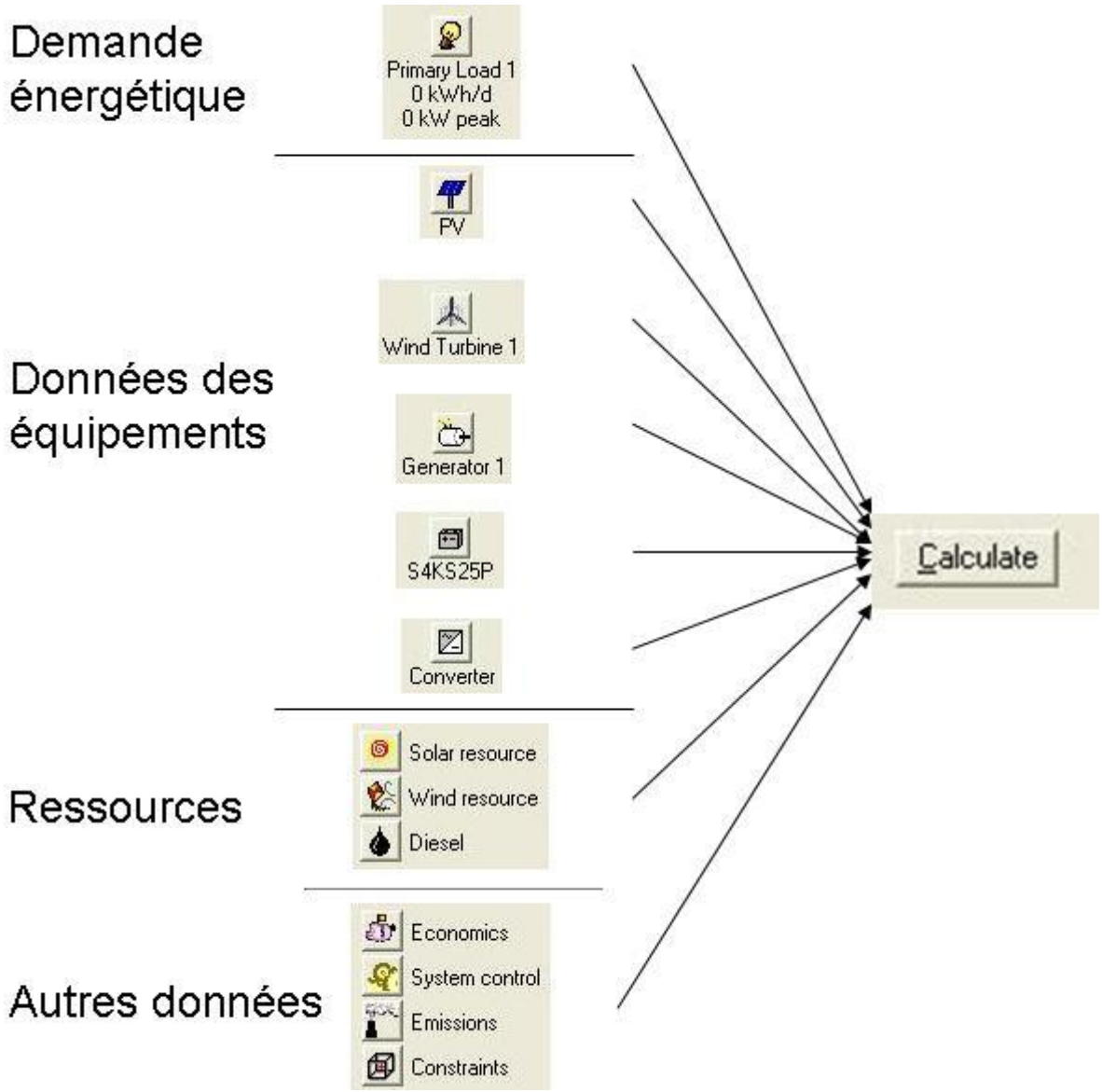


Figure 2.8 Données à fournir

Plus de détails sont définis dans l'annexe 1 pour mieux décrire les informations à fournir pour chacun des icônes illustrés dans la Figure 2.8. Ces icônes sont ceux utilisés pour le présent projet et seuls ces icônes sont détaillés dans l'annexe.

2.4.4 Résultats pouvant être obtenus

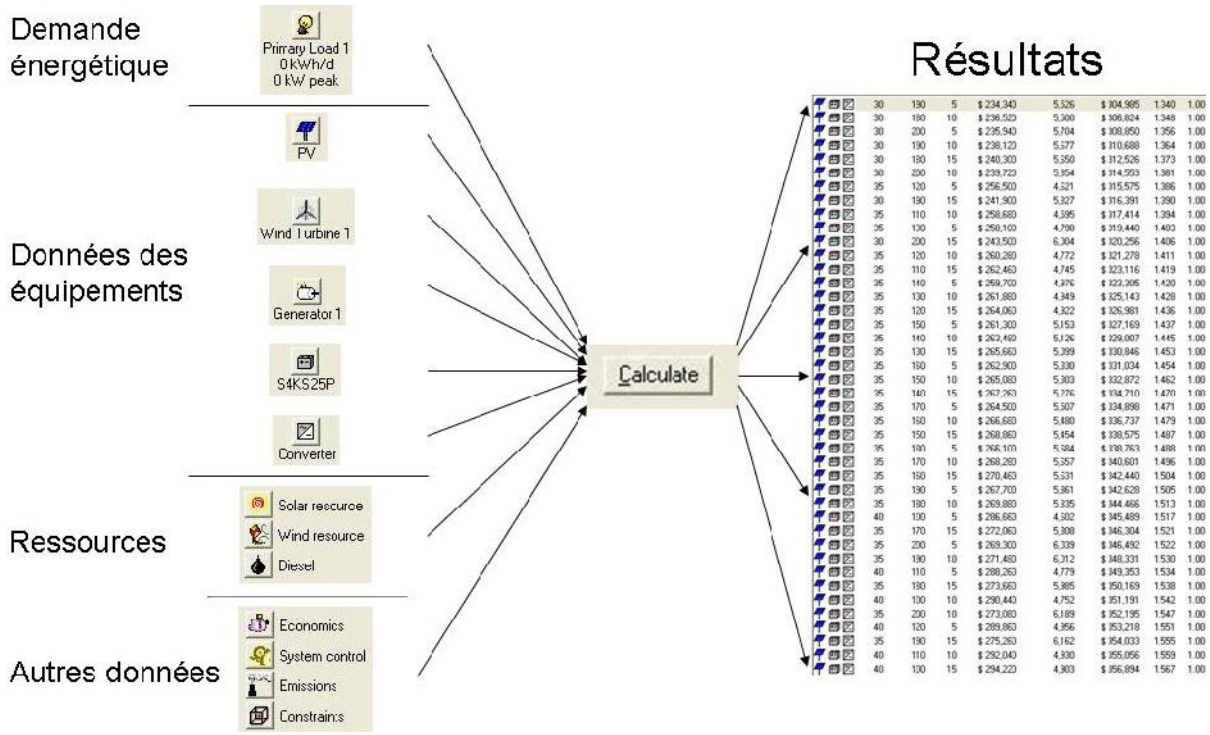


Figure 2.9 Résultats obtenus après simulation

Une fois toutes les données entrées et la simulation lancée, on obtient de nombreux résultats comme illustré à la Figure 2.9 étant donné qu'il est possible d'entrer de nombreuses configurations différentes pour un même type de système. Il est possible de visualiser la liste des résultats de deux façons : « *categorized* » et « *overall* ». Si on choisit l'option « *categorized* », la liste présente l'option la plus économique pour chaque catégorie de système, donc par type de système. Par exemple, HOMER affichera seulement la meilleure option pour un système de type photovoltaïque avec batteries même si la simulation a été faite selon plusieurs configurations différentes (différents nombres de panneaux, différents nombres de batteries). Pour l'option « *overall* », HOMER affiche tous les systèmes sur la même la liste. Le premier résultat affiché est le plus économique parmi tous les types de systèmes simulés. Il est donc important d'optimiser chaque type de système afin d'éliminer les systèmes qui ne sont pas viables. Pour ce faire, on effectue plusieurs simulations dans le but de converger vers un système optimal pour chaque type de système.

Il est très important de se rappeler que le premier résultat donné par HOMER dans la liste des résultats est toujours le système le plus économique trouvé selon « *Net Present Cost* » (coût à valeur actuelle) parmi tous les systèmes et toutes les configurations simulés. Comme mentionné précédemment, les résumés des systèmes et des coûts reliés sont affichés dans la zone des résultats. Un exemple de résumé est montré à la Figure 2.10. On y retrouve les informations suivantes : icônes des équipements du système (partie 1) et leur capacité ou le nombre de batteries (partie 2), l'investissement initial devant être fait (partie 3), les coûts d'opération par an (partie 4), le coût total du système à la valeur actuelle (partie 5), le coût de l'énergie en $/kWh (partie 6) et finalement, la proportion d'énergie renouvelable utilisée dans le système (partie 7).

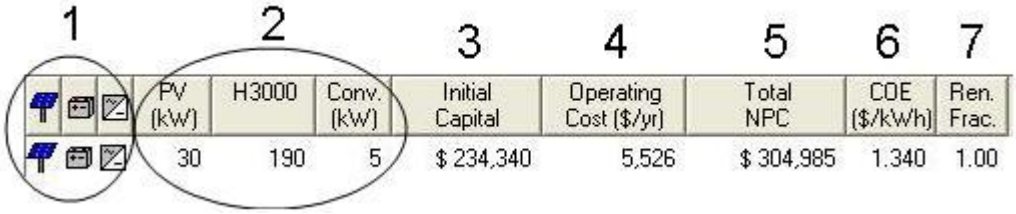
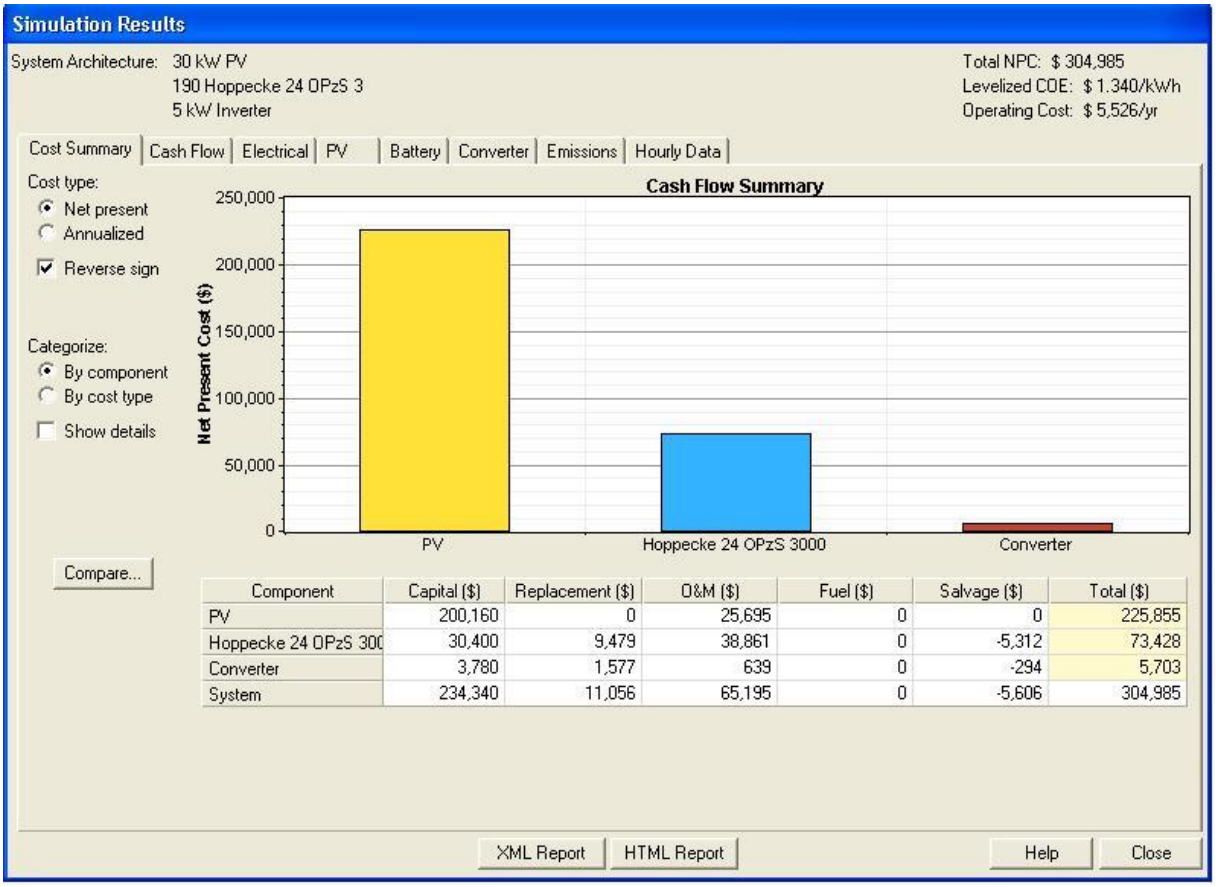


Figure 2.10 Résumé des résultats

Pour plus de détails sur les différents résultats obtenus dans HOMER, il faut cliquer sur le résultat désiré et une fenêtre, Figure 2.11, s'ouvre avec plus d'information.



Component	Capital ($)	Replacement ($)	O&M ($)	Fuel ($)	Salvage ($)	Total ($)
PV	200,160	0	25,695	0	0	225,855
Hoppecke 24 OPzS 300	30,400	9,479	38,861	0	-5,312	73,428
Converter	3,780	1,577	639	0	-294	5,703
System	234,340	11,056	65,195	0	-5,606	304,985

Figure 2.11 Fenêtre des résultats détaillés

Dans cette fenêtre, on retrouve des onglets comme le résumé des coûts, le flux monétaire, des informations sur l'électricité (production, consommation, excès d'énergie, etc.), des détails sur l'énergie et la puissance offertes des équipements (panneaux, batteries, convertisseur), le détail des émissions et finalement, on peut visualiser les données simulées d'heure en heure.

2.4.5 Options possibles

L'option la plus intéressante qu'offre HOMER est les analyses de sensibilité. Une fois les systèmes optimisés, on peut faire ces analyses. Il faut tout d'abord identifier les données jugées sensibles, moins fiables ou plus aléatoires. Ensuite, il est possible d'entrer plusieurs valeurs différentes pour une même donnée afin de vérifier si la solution optimale trouvée reste la meilleure dans tous les cas ou sinon, à partir de quelle valeur cette solution n'est plus valable. Ce type d'analyse permet de vérifier les résultats obtenus en tenant compte de ces données particulières. Les données qui peuvent subir des analyses de sensibilité sont toutes celles qui ont

des accolades dans HOMER comme encerclé à la Figure 2.12. Les données sur lesquelles peuvent être faites les analyses de sensibilité sont pratiquement toutes les données entrées dans HOMER comme l'indiquent les flèches sur la Figure 2.12.

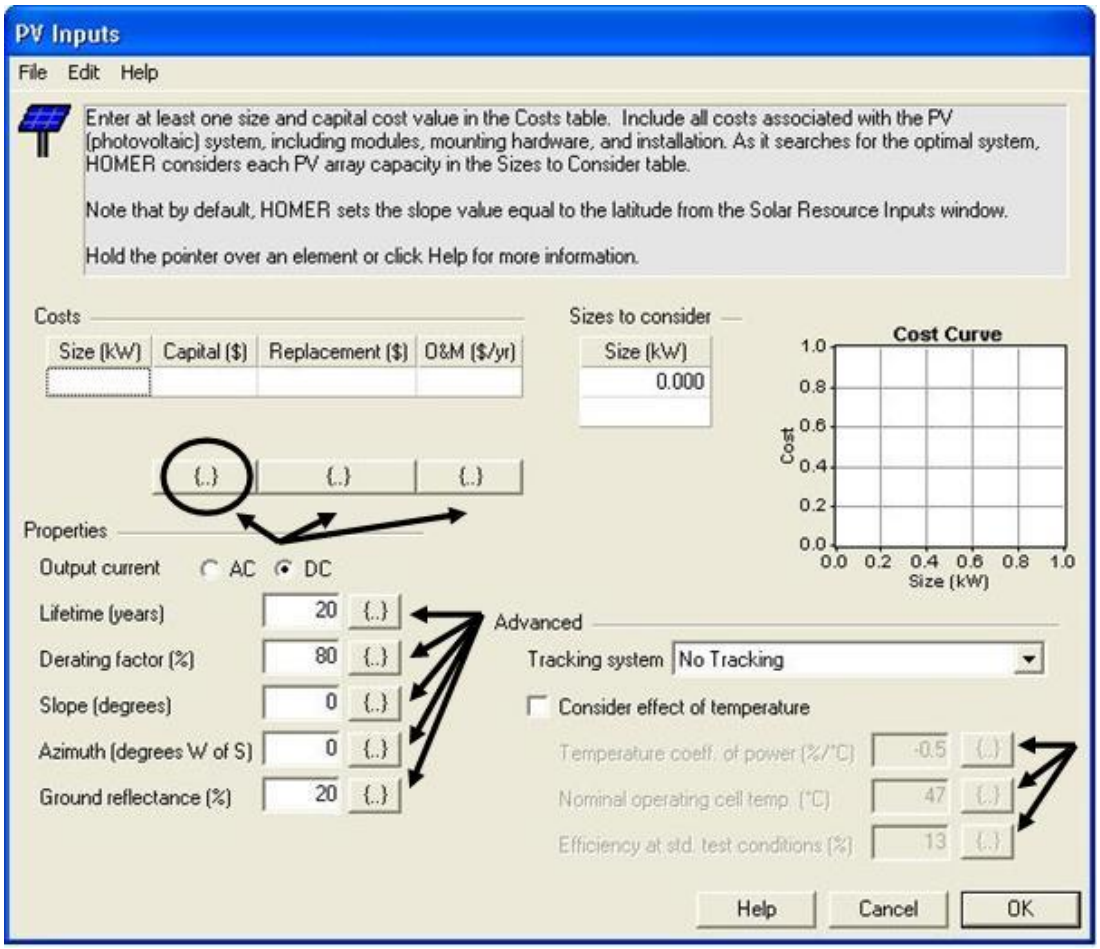


Figure 2.12 Données pour les analyses de sensibilité

Les valeurs à entrer pour les analyses de sensibilités doivent être inscrites dans la fenêtre, Figure 2.13, qui s'ouvre lorsqu'on clique sur l'accolade désirée.

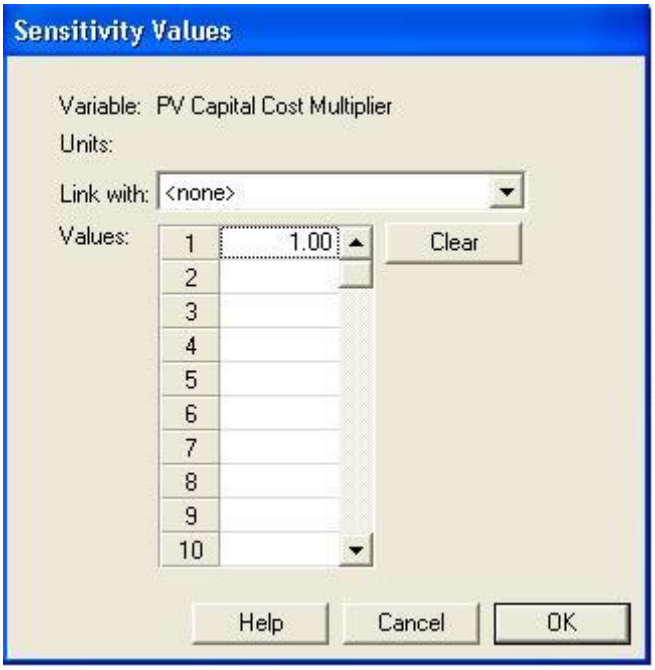


Figure 2.13 Fenêtre des valeurs à entrer pour les analyses de sensibilité

2.5 Présentation de RETScreen

RETScreen International est un logiciel « d'analyse de projets d'énergie propre ». Il offre donc une approche orientée sur la réalisation de projets plutôt qu'une approche d'optimisation de systèmes comme le logiciel HOMER. RETScreen International est supporté par CanmetÉNERGIE de Ressources naturelles Canada. Ce logiciel est très populaire et est utilisé dans plus de 200 pays et par plus de 260 000 utilisateurs. Pour le présent projet, la version utilisée est RETScreen 4 et elle est disponible gratuitement.

2.5.1 Principales caractéristiques

Le logiciel RETScreen permet de simuler différents types de projets, pour différents types d'établissement ou de technologies et selon différentes méthodes d'analyse. Les types de projets possibles sont :

- mesures d'efficacité énergétique,
- production d'électricité,
- production d'électricité – multiples technologies,

- production de chaleur,
- production de froid,
- production de chaleur et d'électricité,
- production de froid et d'électricité,
- production de chaleur et de froid,
- production de froid, de chaleur et d'électricité,
- défini par l'utilisateur.

Pour chacune des options, il est possible de définir des sous-options. Pour les projets de mesures d'efficacité énergétique, on peut choisir le type d'établissement du projet parmi les options suivantes :

- résidentiel,
- commercial,
- institutionnel,
- industriel,
- autre.

Pour la production d'électricité, les technologies disponibles sont nombreuses :

- électricité géothermique,
- électricité solaire thermique,
- énergie de la houle,
- énergie des courants océaniques,
- énergie marémotrice
- éolienne,
- moteur à pistons
- photovoltaïque,
- piles à combustible,

- turbine à gaz,
- turbine à gaz – cycle combiné,
- turbine à vapeur,
- turbine hydroélectrique,
- autre.

Pour la production de froid et de chaleur, de nombreuses technologies sont aussi disponibles. Finalement, il est aussi possible de déterminer le type de réseau parmi les options suivantes :

- réseau central,
- réseau central et charge interne,
- réseau isolé,
- réseau isolé et charge interne,
- hors réseau.

RETScreen permet donc un bon nombre d'analyses pour des projets très diversifiés. De plus, il est possible de faire deux types d'analyse pour un même projet : une analyse simple et courte (méthode 1) ou une analyse approfondie nécessitant de nombreuses données (méthode 2). Pour la présente étude, la production d'énergie sera le type de projet utilisé et pour une situation hors réseau.

2.5.2 Interfaces

Un grand avantage de RETScreen est son interface commune et déjà bien connue de tous. Ce logiciel est en fait des feuilles de calculs sophistiquées qui s'ouvrent dans Excel comme montré à la section 1 de la Figure 2.14.

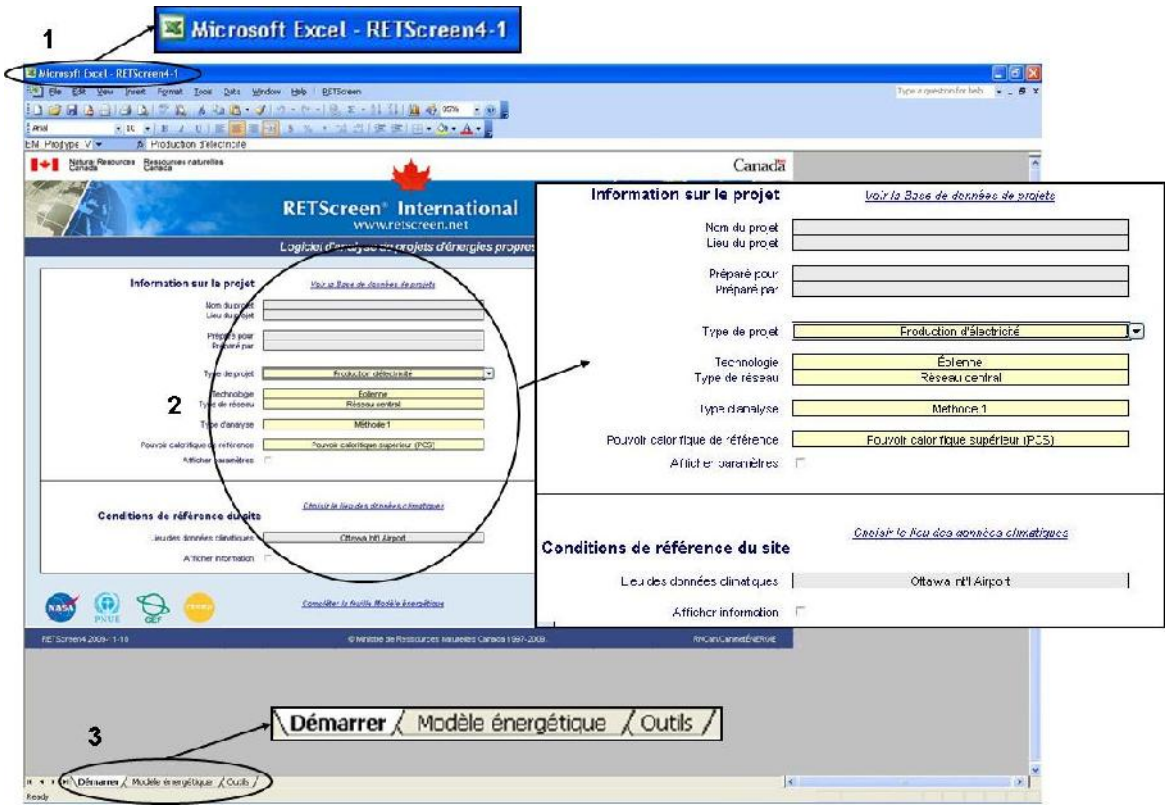


Figure 2.14 Interface RETScreen

Son utilisation est donc simple et intuitive. Il suffit de choisir les options ou d'entrer les données en commençant par le haut de la feuille de calculs et onglet par onglet comme indiqué à la section 2 et 3 de la Figure 2.14. Les résultats s'affichent et se mettent à jour au fur et à mesure que les informations sont entrées.

Figure 2.15 Interface RETScreen – Onglet « démarrer »

L'onglet « démarrer » est relativement court à remplir (Figure 2.15). Ce sont les informations générales du projet. L'onglet « modèle énergétique » (si on choisit la méthode d'analyse 1) comprend les données sur le système de production d'énergie, l'analyse des émissions et l'analyse financière. Si la méthode d'analyse 2 est choisie, l'onglet « modèle énergétique » ne comprend que les informations reliées au système de production d'énergie, les autres sections sont définies dans des onglets séparés : analyse des coûts, analyse des émissions, analyse financière et analyse de risque.

2.5.3 Données à entrer

Pour les données entrées, on débute avec l'onglet « démarrer », on entre les informations du projet donc le nom du projet, le lieu du projet et pour qui et par qui le projet est réalisé, ensuite on choisit selon les options définies le type de projet, la technologie désirée et le type de réseau à simuler. Il faut aussi choisir le type d'analyse, méthode 1 ou méthode 2, et le pouvoir calorifique de référence, pouvoir calorifique supérieur ou pouvoir calorifique inférieur.

Une autre partie importante de l'onglet « démarrer » est la définition du site. Certains sites de partout à travers le monde sont déjà entrés dans la base de données de RETScreen avec des données moyennes par mois de gisement solaire (en kWh/m^2/jour) et éolien (en m/s). Il ne suffit que de sélectionner le pays, la province ou l'état et finalement la ville désirée.

Pour les autres données, prenons l'exemple avec un projet en utilisant le type d'analyse : méthode 1. En choisissant, ce type d'analyse simplifiée, on comprend bien les données nécessaires pour RETScreen.

Pour définir le système de production d'électricité, les panneaux solaires photovoltaïques ou les éoliennes doivent être sélectionnés parmi la base de données des équipements de RETScreen. On doit déterminer leur facteur d'utilisation en pourcentage et indiquer le prix de l'électricité exportée en $/MWh.

Dans la section analyse d'émissions, les frais de transactions pour les crédits de GES en pourcentage et le crédit pour réduction de GES en $/tonne de CO_2 doivent être entrés. On peut aussi choisir une option pour comparer la réduction nette d'émissions de GES en tonnes de CO_2 à :

- automobiles et camions légers non utilisés,
- litres d'essence non consommés,
- barils de pétrole brut non consommés,
- individus réduisant leur consommation énergétique de 20%,
- acres de forêt absorbant du carbone,
- hectares de forêt absorbant du carbone,
- tonnes de déchets recyclés.

Pour la section de l'analyse financière, les paramètres financiers à définir sont le taux d'inflation, la durée de vie du projet et le ratio d'endettement. Le coût pour le système de production d'électricité doit être déterminé (coût initial pour les éoliennes ou les panneaux et pour les autres équipements). Les autres sections à remplir sont les encouragements et subventions, les frais annuels et paiements de la dette et les économies et revenus annuels.

En résumé, les informations à fournir sont plutôt d'ordre financier une fois que le système est défini.

2.5.4 Résultats pouvant être obtenus

Les résultats obtenus par RETScreen sont une analyse financière et une analyse des émissions. Dans l'analyse financière, le graphique des flux monétaires cumulatifs est très intéressant et très visuel.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Démarche générale du projet

La démarche générale pour effectuer le projet est définie dans la Figure 3.1.

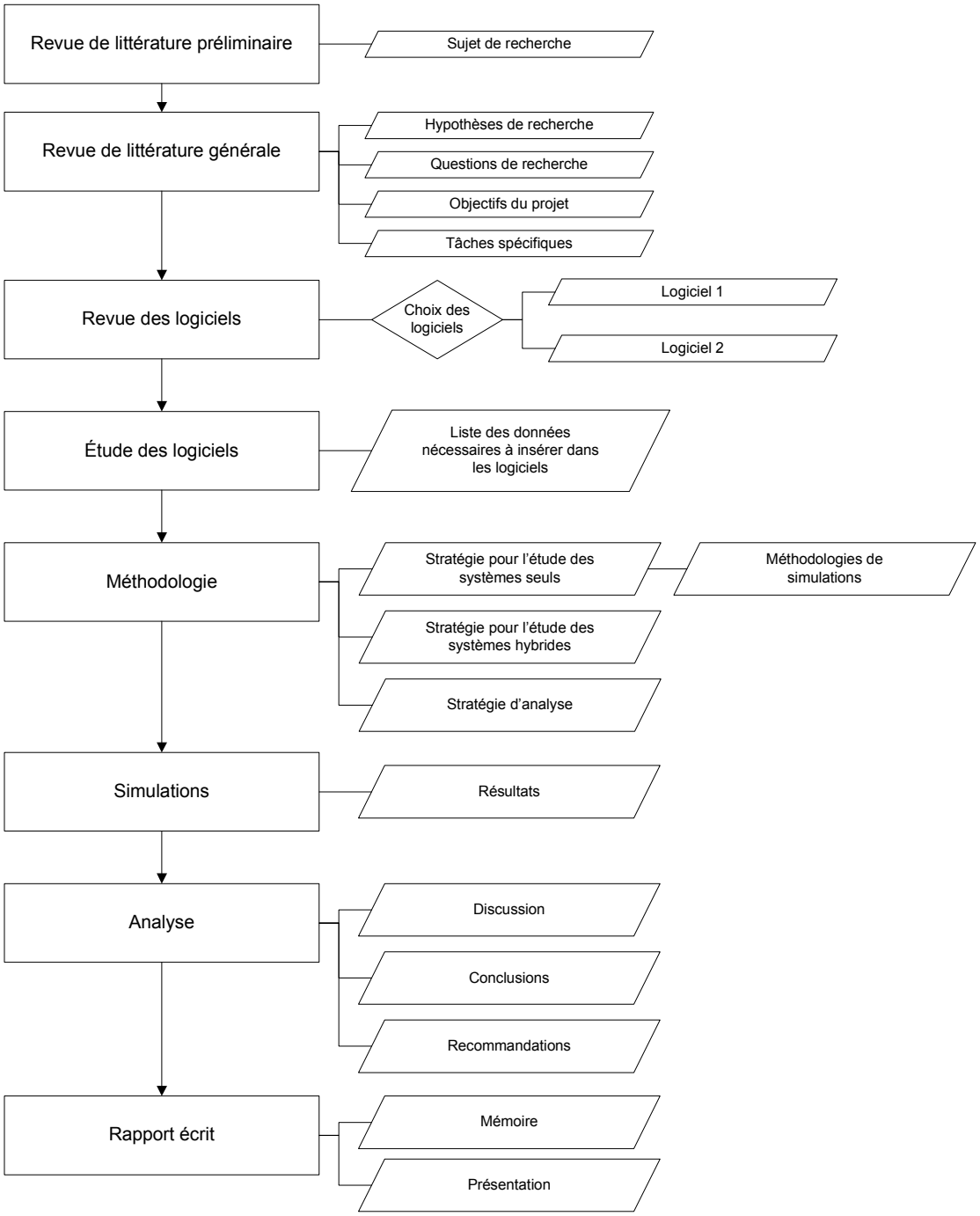


Figure 3.1 Démarche générale du projet

Tout d'abord, une revue de littérature préliminaire est effectuée afin de déterminer le sujet précis du projet. Par la suite, la revue de littérature générale a permis de déterminer les hypothèses de recherche, les questions de recherche, les objectifs du projet et les tâches spécifiques nécessaires. Une revue des logiciels est faite pour aider à mieux choisir les logiciels à utiliser. Une fois sélectionnés, les logiciels doivent être étudiés et utilisés afin de préciser les données nécessaires à insérer dans le logiciel pour obtenir des résultats probants. La méthodologie comprend la stratégie pour l'étude des systèmes seuls, celle pour l'étude des systèmes hybrides et la stratégie d'analyse. Des méthodologies de simulations sont aussi déterminées qui sont une extension faisant partie de la stratégie pour l'étude des systèmes hybrides. Ensuite, les simulations sont faites pour parvenir aux résultats utilisés pour l'analyse qui amène à une discussion, des conclusions et des recommandations. Finalement, le tout est consigné dans ce mémoire et une présentation est effectuée pour des fins de diffusion.

3.2 Stratégie pour l'étude des systèmes seuls

Les données nécessaires pour l'étude sont identifiées et une recherche documentaire pour trouver les données manquantes est effectuée. Le dimensionnement manuel est ensuite réalisé. L'étude des systèmes seuls (éolien, diésel et photovoltaïque) est faite sur chacun des logiciels HOMER et RETScreen. Tout d'abord, certaines validations sont faites : validation des données d'ensoleillement entre HOMER et RETScreen, validation des simulations sur HOMER en comparant les simulations et les calculs manuels, en comparant Saint-Hubert à un lieu très ensoleillé et en comparant Saint-Hubert à un lieu très venteux. Une dernière validation est envisagée, celle avec les fichiers disponibles dans HOMER ou RETScreen. Par la suite, les systèmes seuls sont comparés entre eux.

3.3 Stratégie pour l'étude des systèmes hybrides

Une fois les simulations validées avec les systèmes seuls, les données sont utilisées pour les systèmes hybrides. Ensuite, les différentes combinaisons de scénarios sont étudiées et comparées. Parmi ces scénarios, on considère la comparaison avec la situation connectée au réseau.

3.4 Méthodologies spécifiques aux simulations

Une démarche pour le dimensionnement est définie conjointement avec une démarche pour les simulations sur HOMER pour les systèmes simples. Des démarches ont été élaborées pour les systèmes photovoltaïque, éolien et diésel seuls et pourront être réutilisées par des étudiants pour les cours ENE8210-Efficacité des sources d'énergie et MET8220-Technologies solaires photovoltaïques dans le cadre du projet de cours. Elles ont été développées pour le logiciel HOMER, mais les principes de dimensionnement sont les mêmes, peu importe le logiciel.

La démarche générale pour le dimensionnement et les simulations est résumée en quelques étapes :

1. Évaluation de la demande énergétique (consommation d'énergie);
2. Pré-dimensionnement à la main des équipements;
3. Identifier les équipements nécessaires pour le système (panneaux solaires, convertisseur, batteries…) dans le logiciel HOMER;
4. Entrer les données nécessaires dans le logiciel :
    a. de consommation énergétique;
    b. de gisement solaire pour le lieu désiré;
    c. pour les équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien);
5. Lancer le calcul dans HOMER;
6. Optimiser les résultats de HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système;
7. Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire;
8. Valider le système.

3.5 Méthodologie pour le système photovoltaïque

La méthodologie est détaillée à l'annexe 2 pour le dimensionnement du système photovoltaïque.

3.6 Méthodologie pour le système éolien

Celle du système éolien se trouve à l'annexe 3.

3.7 Méthodologie pour le système diésel

Finalement, celle du diésel est à l'annexe 4.

3.8 Résultats à analyser

Les résultats qui seront analysés sont les données de dimensionnement pour les panneaux solaires, les éoliennes, la génératrice diésel et pour l'onduleur pour les différents systèmes. Ensuite, les coûts d'opération (les annuités), le coût total à sa valeur actuelle du système ainsi que le coût de l'énergie en $/kWh et le pourcentage d'excès d'énergie seront analysés. Différentes analyses de sensibilité sur les coûts seront aussi détaillées.

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES DONNÉES UTILISÉES

4.1 Demande énergétique globale d'une résidence au Québec

Les données de demande énergétique sont offertes par Hydro-Québec pour le secteur résidentiel. Elles sont offertes d'heure en heure pour les 365 jours de l'année. La consommation pour une seule résidence est définie à partir du fichier produit par Hydro-Québec. Pour obtenir cette consommation, j'ai divisé la consommation totale du secteur résidentiel par le nombre de résidences au Québec obtenant ainsi une consommation moyenne pour une résidence.

4.1.1 Profil de consommation par mois pour l'année

Sur ce profil (Figure 4.1) la consommation journalière est identifiée, tous les jours de l'année sont représentés et chaque mois est d'une couleur différente. On remarque bien que les mois d'été (juin, juillet, août et septembre) sont les mois nécessitant une demande énergétique moins élevée. Au contraire, les durs mois de l'hiver (janvier, février et décembre) montrent une forte consommation d'énergie. Une représentation de la consommation journalière moyenne par mois est affichée à la Figure 4.2.

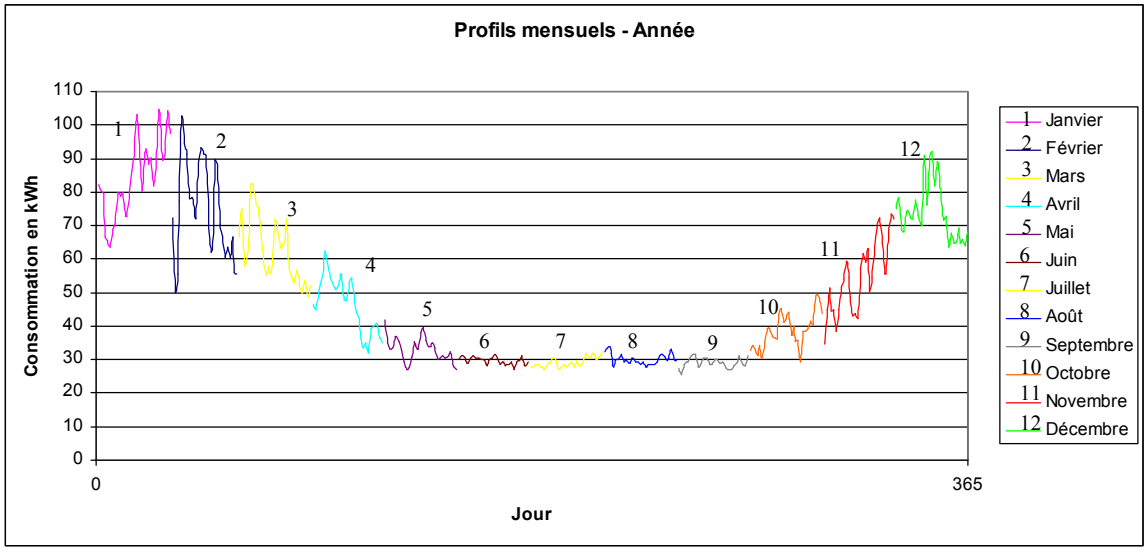


Figure 4.1 Profils de consommation pour l'année, identifiés par mois

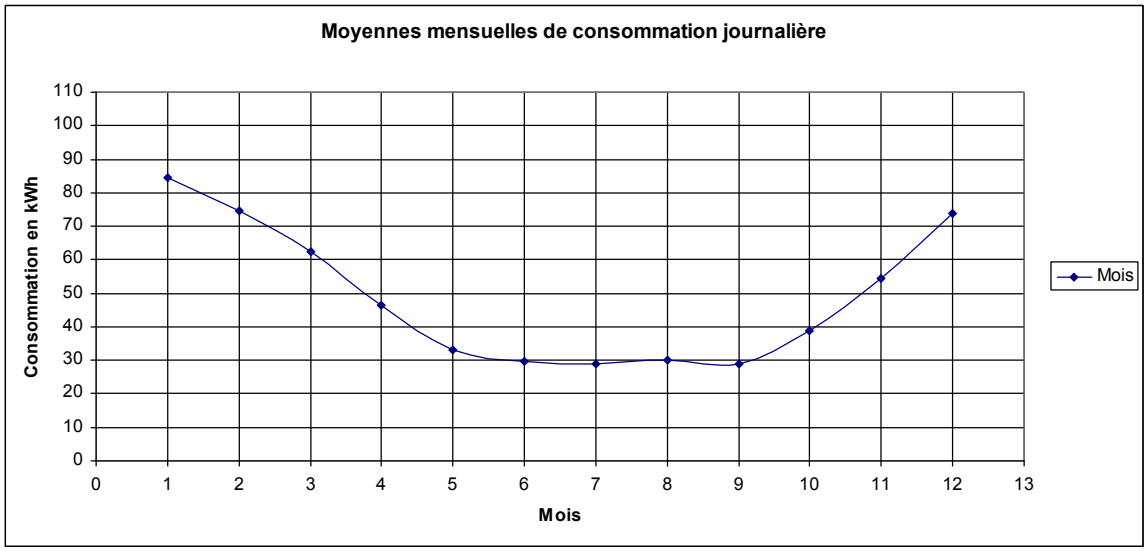


Figure 4.2 Consommation journalière moyenne par mois

4.1.2 Profils journaliers

Les profils journaliers reflètent la consommation des résidences pour les 24 heures d'une journée. Il est difficile de déduire une évolution en utilisant tous les profils de l'année à la fois. En séparant les profils de janvier à avril (Figure 4.3), de mai à septembre (Figure 4.4) et d'octobre à décembre (Figure 4.5), il est plus aisé de remarquer une progression.

On remarque très bien que de janvier à avril, la consommation journalière diminue progressivement. Pour mai à septembre, les profils journaliers mensuels se ressemblent beaucoup, seul le mois de mai montre une consommation un peu plus accrue et un profil un peu différent. D'octobre à décembre, la consommation journalière recommence à progresser de façon significative.

En portant un regard sur toute l'année, on note que les heures de consommation importante sont les mêmes pour tous les mois de l'année. Les plus fortes heures de consommation sont au retour du travail jusqu'au coucher (entre 16h00 et 22h00) et le matin entre le réveil et le départ (entre 6h00 et 9h00).

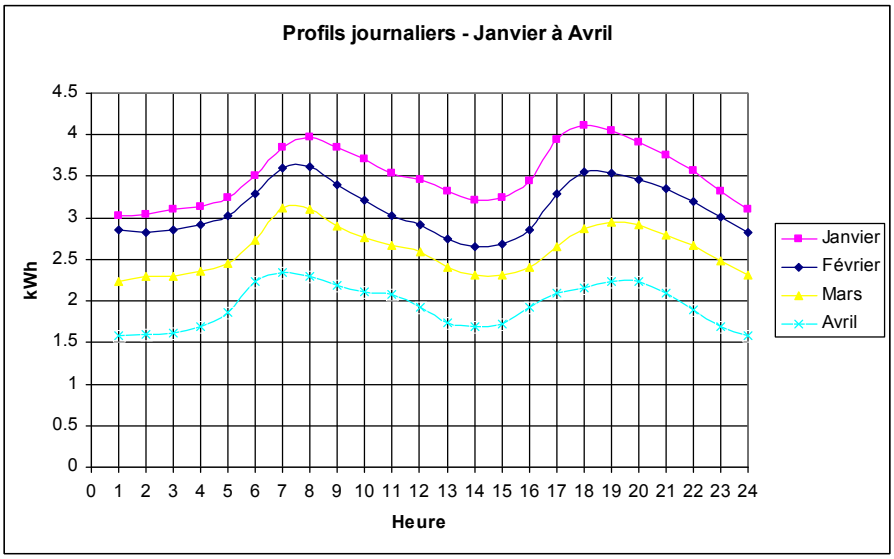


Figure 4.3 Profils journaliers – Janvier à avril

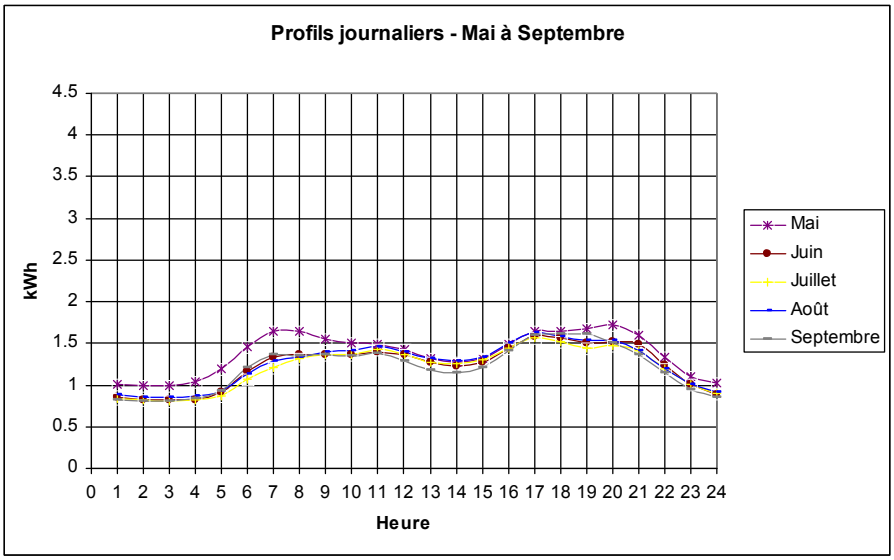


Figure 4.4 Profils journaliers – Mai à septembre

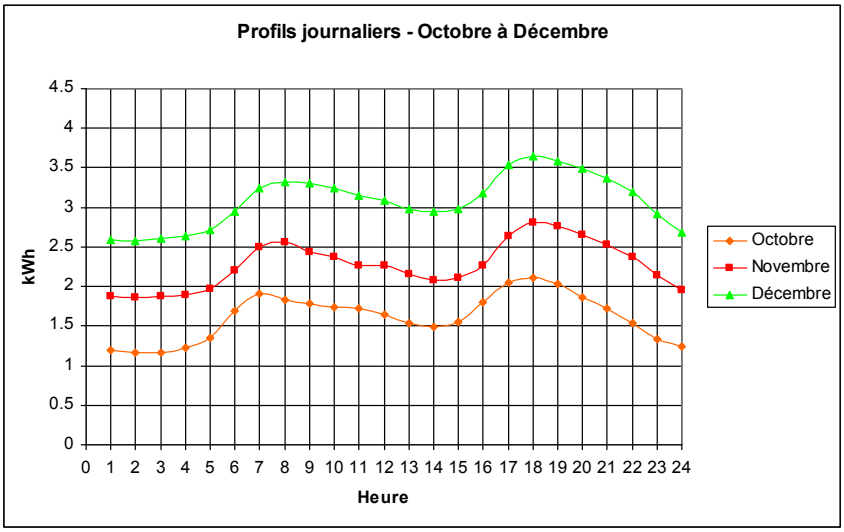


Figure 4.5 Profils journaliers – Octobre à décembre

4.1.3 Répartition de la demande énergétique pour le secteur résidentiel

La répartition d'énergie dans une résidence se répartit comme au Tableau 4.1 (Canada, 2010) entre le chauffage des locaux, le chauffage de l'eau, les appareils ménagers, l'éclairage et la climatisation. On remarque que le chauffage nécessite plus de 60 % des besoins en énergie, alors que la climatisation ne vaut environ 1 %.

Tableau 4.1 Consommation d'énergie par utilisation finale en pourcentage entre 1990 et 2007

	Minimum	**Maximum**	**Moyenne**
Chauffage des locaux	62.2	66.7	64.8
Chauffage de l'eau	12.1	15.0	13.5
Appareils ménagers	15.4	17.7	16.4
Éclairage	4.1	5.1	4.5
Climatisation	0.2	1.5	0.7

Dans une résidence au Québec reliée au réseau électrique, l'électricité est souvent utilisée pour couvrir tous les besoins énergétiques de cette résidence y compris le chauffage. Au Québec, plus de 70% des logements utilise l'électricité pour se chauffer (Funk, 2010). Étant donné la consommation élevée d'énergie d'une maison moyenne, il est aberrant d'utiliser les énergies éoliennes et photovoltaïques pour le chauffage de l'eau et des locaux quand d'autres alternatives sont disponibles et plus efficaces (géothermie, solaire thermique). Pour le chauffage de l'eau, par exemple, sur toute l'année, un chauffe-eau solaire au Québec peut combler entre 30% et 90% des besoins en eau chaude. Comme de nombreux ouvrages en témoignent, un kWh économisé vaut mieux qu'un kWh produit.

Il est absurde d'utiliser les panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui servira au chauffage des locaux ou au chauffage de l'eau. Le rendement de conversion d'énergie n'est pas suffisant pour imaginer utiliser cette technologie alors que d'autres solutions sont plus efficaces et moins coûteuses.

Si on utilise les éoliennes et le solaire photovoltaïque que pour les besoins en électricité, on peut donc inclure la consommation d'énergie des appareils ménagers, l'éclairage et même la climatisation.

De plus, si un effort est fait pour utiliser des appareils éco-énergétiques, la consommation peut être significativement diminuée. (1500 kWh/an en électricité, exemple allemand maisons, 4 personnes (Luque & Hegedus, 2003). Des appareils efficaces et ultra-efficaces permettent des économies d'énergie de 30 à 60 % comparativement à des appareils standards (RNCREQ, 2009). De plus, le surcoût à l'achat de ces appareils est largement justifié par les économies faites par la diminution de la grandeur du système photovoltaïque nécessaire (RNCREQ, 2009).

4.2 Évaluation de la demande énergétique en électricité pour une résidence moyenne

Pour la localisation de Saint-Hubert, la consommation totale a tout d'abord été utilisée (48,88 kWh/j), ensuite la consommation sans chauffage a été estimée (19,5kWh/j) et finalement la consommation sans chauffage, mais avec des appareils efficaces a été modélisée (11,7kWh/j). On a donc trois consommations différentes : consommation totale, consommation sans chauffage et consommation sans chauffage et avec utilisation d'appareils efficaces.

Les besoins énergétiques pour le chauffage ont été estimés à 60 % de la consommation totale. Les besoins en chauffage ont été retirés de la consommation totale. La quantité à retirer par mois a été déterminée selon la répartition des degrés-jour, ensuite cette quantité a été répartie sur toutes les heures du mois. Le modèle a ensuite été mis à l'échelle.

Les appareils efficaces offrent une économie de 40 % d'énergie. La consommation sans chauffage et avec l'utilisation d'appareils efficaces est donc estimée à 60 % de la consommation sans chauffage.

4.2.1 Comparaison des données de gisement solaire RETScreen et HOMER

Les données de gisement solaire intégrées dans RETScreen et celles disponibles dans HOMER en le liant avec le site de la NASA présentent des différences. Plusieurs raisons expliquent cette divergence. Tout d'abord, dans RETScreen, certaines données sont issues d'une base de données de CANMET Energy, organisme qui supporte RETScreen, et sont référencées comme données prises au sol. Les autres données proviennent des données disponibles sur le site de la NASA. Pour ce qui est de HOMER, il est possible de lier ce logiciel avec le site de données de la NASA. Une fois le logiciel lié, on peut obtenir des données de gisement solaire partout sur le globe. Il existe cependant des différences entre les données de HOMER et celles issues du site de la NASA. Lorsqu'une localisation est entrée, HOMER va d'abord chercher dans la base de données de NREL dans laquelle des données de gisement solaire sont disponibles pour environ 25 % du globe. S'il la localisation ne se trouve pas dans cette base de données, HOMER va rechercher dans les données de la NASA. HOMER priorise les données de NREL puisqu'elles sont plus précises.

CHAPITRE 5 VALIDATION DES SIMULATIONS ET EFFET DU GISEMENT SUR LA CONSOMMATION

5.1 Validation des données d'ensoleillement de RETScreen et d'HOMER

Étant donné des écarts entre les données d'HOMER et celles de RETScreen, des simulations ont été faites à la fois avec les données d'ensoleillement d'HOMER et celles de RETScreen afin de vérifier si les résultats diffèrent beaucoup pour le système photovoltaïque simulé sous HOMER. L'exercice a été fait avec les trois différentes données de consommation étudiées :

- Consommation totale moyenne pour une résidence,
- Consommation sans chauffage pour une résidence,
- Consommation sans chauffage et utilisant des appareils efficaces.

Au Tableau 5.1, la comparaison est faite pour la consommation totale tandis qu'au Tableau 5.2, c'est la comparaison avec la situation sans chauffage qui est définie et finalement, le Tableau 5.3 présente le dernier cas, donc le calcul a été fait avec la consommation sans chauffage et en utilisant des appareils efficaces. Dans tous les cas, un plus petit système est nécessaire lorsqu'on utilise les données de gisement solaire issues du logiciel RETScreen; il nécessite moins de puissance crête installée et un nombre de batteries équivalent ou inférieur. Les plus grandes différences sont observées au niveau des données pour les coûts qui découlent de la dimension du système installé. Les données de gisement sont divergentes jusqu'à 11 % pour certains mois, alors que les valeurs issues des simulations présentent au maximum un écart de 8 %. Pour ce qui est de l'excès d'énergie, les valeurs trouvées sont similaires avec un maximum de 2 % d'écart. Globalement, les écarts sont sous les 10 %, donc du même ordre de grandeur. Dans l'étude principale, les données de HOMER sont utilisées représentant ainsi le plus gros système nécessaire, donc le pire cas.

Tableau 5.1 Système photovoltaïque évalué avec les gisements de HOMER et de RETScreen pour la consommation totale de 48,88 kWh/j

Conso totale, moy : 48.88 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost ($/an)**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
PV seul (DHOMER)	65kWc, 195*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	392553	8434	500362	2.199	73.6
PV seul (DRET)	60kWc, 195*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	371853	8424	479534	2.107	73.8
	Écart en %	-5.3	-0.1	-4.2	-4.2	0.3

Tableau 5.2 Système photovoltaïque évalué avec les gisements de HOMER et de RETScreen pour la consommation sans chauffage de 19,5 kWh/j

Conso sans chauffage scaled, scaled à 19.5 : moy : 19.5 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
PV seul (DHOMER)	23kWc, 56*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	130908	2437	162063	1.782	70.3
PV seul (DRET)	22kWc, 51*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	123733	2226	152187	1.674	71.6
	Écart en %	-5.5	-8.7	-6.1	-6.1	1.8

Tableau 5.3 Système photovoltaïque évalué avec les gisements de HOMER et de RETScreen pour la consommation sans chauffage et avec appareils efficaces de 11,7 kWh/j

Conso sans chauffage scaled, scaled 11.7 (appareils efficaces), moy : 11.7 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
PV seul (DHOMER)	14kWc,34*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	79446	1475	98298	1.801	70.7
PV seul (DRET)	13kWc,32*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	74092	1389	91848	1.683	71.1
	Écart en %	-6.7	-5.8	-6.6	-6.6	0.6

5.2 Validation des simulations avec la consommation totale à Saint-Hubert

La validation se fait avec les données de consommation d'une résidence moyenne pour la ville de Saint-Hubert. Les systèmes validés sont les systèmes seuls, donc : éolien, diésel et photovoltaïque. Les calculs de dimensionnement manuels sont comparés aux résultats donnés par HOMER. De plus, une comparaison de la situation à Saint-Hubert est réalisée avec la situation pour un lieu très ensoleillé et un lieu très venteux.

5.2.1 Comparaison des calculs manuels et des simulations pour le dimensionnement

Normalement, le dimensionnement à la main se fait à partir des données de consommations les plus importantes et avec la donnée du gisement le plus faible. Cette façon est très rapide et permet d'obtenir un ordre de grandeur, cependant pour des régions comme le Québec, le système s'en retrouve surdimensionné. J'ai donc calculé différents cas possibles.

Pour le système photovoltaïque, les cas de dimensionnement étudiés sont les suivants :

- Avec la donnée mensuelle de la plus grande consommation journalière moyenne et avec la donnée mensuelle du plus faible gisement moyen,
- Avec la donnée annuelle de la consommation journalière moyenne et avec la donnée mensuelle du plus faible gisement moyen,
- Avec la donnée mensuelle de la plus grande consommation journalière moyenne et avec la donnée du gisement moyen annuel,
- Avec la donnée annuelle de la consommation journalière moyenne et avec la donnée du gisement moyen annuel.

Dans le Tableau 5.4 sont décrits les différents cas définis précédemment et ils sont comparés au système optimal tel qu'obtenu avec HOMER. On remarque tout d'abord que les résultats sont du même ordre de grandeur que les calculs manuels. Pour la puissance totale des panneaux nécessaires, le résultat d'HOMER se situe entre les deux premiers cas étudiés : le cas pour lequel le système on prend la pire donnée de consommation et la pire donnée de gisement et le cas pour lequel on utilise la pire donnée moyenne de consommation et la donnée du pire gisement. Le calcul manuel de dimensionnement de base ne peut pas être aussi raffiné que celui d'HOMER puisqu'HOMER optimise selon les données de consommation fournies pour chaque heure de l'année. Si l'on veut faire des calculs de dimensionnement aussi précis, on se retrouve à faire un système équivalent à un logiciel comme HOMER, c'est pourquoi un simple dimensionnement de base a été ici utilisé. Au niveau des batteries, le dimensionnement manuel se base sur 8 jours d'autonomie, nombre de jours nécessaire selon les données statistiques de jours sans ensoleillement. Dans mon dimensionnement manuel, j'ai tenu compte du nombre de batteries en série et en parallèle. J'ai obtenu que pour combler les besoins plus de deux séries de 60 batteries

de 200 Ah mises en parallèle étaient nécessaires, donc entre 160 et 240 batteries sont nécessaires. Dans HOMER, je n'ai pas utilisé la fonction permettant de mettre les batteries en série et en parallèle afin d'obtenir un résultat plus précis, ce résultat est de 195 batteries. Le nombre de batteries proposé par HOMER se situe entre les valeurs trouvées par calcul. Pour la puissance de l'onduleur, les deux valeurs sont semblables. Somme toute, les résultats obtenus par HOMER sont sensés et je les considère comme valides.

Tableau 5.4 Comparaison des calculs manuels et des simulations sous HOMER pour Saint-Hubert avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système photovoltaïque

Type d'appareils	Simulations HOMER	Calculs	
		Résultats du calculs	Information sur les calculs
Panneaux	65kWc	97.5kWc	Consommation du pire mois avec gisement du pire mois
		56.5kWc	Consommation moyenne avec gisement du pire mois
		34.4kWc	*Consommation du pire mois avec gisement moyen*
		20.0 kWc	*Consommation moyenne avec gisement moyen*
Batteries	195*200Ah	160 ou 240 batteries	8 jours d'autonomie
Onduleur	6 kW	6.5625kW	à partir de la puissance instantanée maximale

Le Tableau 5.5 présente la même comparaison, mais cette fois-ci pour le système éolien. Comme déjà relaté dans la revue de littérature, peu de documents existent pour le dimensionnement simple de système éolien non raccordé au réseau. La littérature décrit plutôt comment concevoir une éolienne plutôt que d'exposer comment dimensionner à partir d'éoliennes existantes. Le dimensionnement s'effectue normalement en se basant sur la courbe de puissance d'une éolienne et la distribution des vents selon leur vitesse. Une éolienne a donc été sélectionnée afin de pouvoir effectuer les calculs et de pouvoir faire une comparaison. Plusieurs cas de dimensionnement ont aussi été étudiés :

- Avec la puissance nécessaire pour répondre aux besoins et la puissance maximale théorique pouvant être retirée du gisement moyen du pire mois,
- Avec la puissance nécessaire pour répondre aux besoins et la puissance maximale pouvant être retirée du gisement éolien (en effectuant une moyenne pondérée avec les données de gisement et en fonction de la fréquence des vents),
- Avec la puissance nécessaire pour répondre aux besoins et la puissance des éoliennes (cette puissance des éoliennes est une moyenne pondérée selon la courbe de puissance et la fréquence des vents).

Au Tableau 5.5, on observe que le dimensionnement des éoliennes selon le premier cas mène à un surdimensionnement, alors que les deux autres valeurs offrent un intervalle du même ordre de grandeur. Le résultat trouvé par HOMER se situe effectivement entre ces deux valeurs. Au niveau du dimensionnement des batteries pour le système éolien, il est difficile d'arriver à une bonne estimation sauf si des mesures ont été prises sur place. Les données normalement disponibles sont la fréquence des vents selon différents intervalles de vitesse. Il est difficile de trouver le nombre de jours sans vent alors qu'il est facile de trouver le nombre de jours sans ensoleillement pour les gisements solaires. L'estimation a donc été faite comme si toute la proportion de vent entre 0 et 2 m/s, vent insuffisant pour faire tourner l'éolienne, était consécutive, c'est pourquoi le nombre de batteries est surestimé. Les quantités trouvées sont donc des bornes supérieures, mais la vraie quantité doit être significativement moindre. HOMER offre un résultat de 65 batteries 12 V de 200 Ah. Ce serait donc acceptable. Pour l'onduleur, étant donné que la consommation est la même, l'onduleur est de même puissance que pour le système photovoltaïque. Au Tableau 5.6, le système diésel seul est comparé aux calculs manuels. Les deux valeurs sont similaires, elles ont un écart de 5 %.

Tableau 5.5 Comparaison de calculs manuels et des simulations sous HOMER pour Saint-Hubert avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système éolien

Type d'appareils	**Simulations HOMER**	**Calculs**	
		Résultats du calculs	**Information sur les calculs**
Éoliennes	13*2kW	*39 éoliennes*	*Pnécessaire / Pmax pouvant être retirée du vent du pire mois*
		17 éoliennes	Pnécessaire / Pmax pouvant être retirée du vent avec moyenne pondérée du vent (en fc de la fréquence des vents)
		10 éoliennes	P nécessaire / P des éoliennes (moyenne pondérée) selon la courbe de puissance et la fréquence des vents
Batteries	65*200Ah	243 batteries	Avec consommation moyenne (surestimée*)
		419 batteries	Avec consommation du pire mois (surestimée*)
Onduleur	6kW	6.5625kW	à partir de la puissance instantanée maximale

Tableau 5.6 Comparaison de calculs manuels et des simulations sous HOMER pour Saint-Hubert avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système diésel

Type d'appareils	**Simulations HOMER**	**Calculs**	
		Résultats du calculs	**Information sur les calculs**
Génératrice	6kW	6.3kW	à partir de la puissance instantanée maximale

5.2.2 Comparaison entre Saint-Hubert et un lieu très ensoleillé

Une comparaison entre Saint-Hubert du Québec et Djibo du Burkina Faso (situation très ensoleillée) a été faite. J'ai donc imposé la même consommation pour les 2 lieux afin de voir l'effet de l'ensoleillement sur le dimensionnement et les coûts du système. Cette comparaison a été faite pour les trois profils de consommation pour une résidence dans le cas du système photovoltaïque.

Pour les données d'ensoleillement (rayonnement global sur une surface horizontale), en moyenne, Djibo offre 68 % de plus d'ensoleillement que Saint-Hubert (Tableau 5.7). Saint-Hubert a de plus grands écarts : un minimum de 1.280 kWh/(m^2j) en décembre et un maximum de 5.610 kWh/(m^2j) en décembre. Les variations sont moindres pour Djibo : un maximum de 6.524 kWh/(m^2j) en mai et un minimum de 5.111 kWh/(m^2j) en janvier.

Tableau 5.7 Moyenne d'ensoleillement pour Saint-Hubert et Djibo

	Saint-Hubert en kWh/(m^2j)	**Djibo en kWh/(m^2j)**	**Différence**
Moyenne	3.522	5.941	69%

Les systèmes installés requis pour les 2 lieux sont détaillés dans le Tableau 5.8. Le système à Djibo nécessite 63 % moins de panneaux que celui installé à Saint-Hubert et c'est donc cohérent avec l'ensoleillement supplémentaire de 68 % à Djibo. Au niveau des coûts, les coûts initiaux sont de 56 % moins élevés pour Djibo, alors que le coût total et le coût de l'énergie par kWh sont de 51 % moins élevés. La différence est moins élevée pour les coûts d'opération qui sont principalement reliés aux coûts d'opération, d'entretien et de remplacement des batteries.

Tableau 5.8 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très ensoleillé sous HOMER avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système photovoltaïque

Conso totale, moy : 48.88 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost ($/an)**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
PV seul (DHOMER) St-Hubert	65kWc, 195*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	392553	8434	500362	2.199	73.6
PV seul (DHOMER) Djibo	24kWc, 110*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	171218	5622	243083	1.068	51
	Comparaison en % :	-56	-33	-51	-51	-31

Les coûts d'opération comprennent globalement les frais d'opération et d'entretien en plus des coûts en carburant (ici, nul) et des frais de remplacement d'équipement, tout ceci remis en un coût par année; on y enlève aussi le prix récupéré de l'équipement qui n'est pas à sa fin de vie à la fin du projet. Djibo nécessite 43 % moins de batteries et les coûts d'opération sont diminués de 33 %. Les Tableau 5.9 et Tableau 5.10 présentent le détail des coûts d'opération pour le système à Djibo et à Saint-Hubert.

Tableau 5.9 Détail des coûts d'opération pour le système photovoltaïque à Djibo pour une résidence moyenne

	Remplacement	O&M	Fuel	Salvage	Operating costs
PV	0	48	0	0	48
Batteries	4,979	668	0	-215	5432
Onduleur	166	6	0	-31	141
Système	5,146	722	0	-245	5623

Tableau 5.10 Détail des coûts d'opération pour le système photovoltaïque à Saint-Hubert pour une résidence moyenne

	Remplacement	O&M	Fuel	Salvage	Operating costs
PV	0	130	0	0	130
Batteries	8,057	1,184	0	-1,079	8162
Onduleur	166	6	0	-31	141
Système	8,224	1,320	0	-1,110	8434

Au niveau de l'excès d'énergie, Djibo a 31 % moins de surplus en énergie par rapport à Saint-Hubert. Le système peut donc être mieux dimensionné ou mieux adapté, dans ce cas-ci, le système photovoltaïque est mieux adapté pour une situation plus ensoleillée et avec un gisement plus uniforme. Il est normal d'avoir beaucoup de surplus d'énergie à Saint-Hubert puisque la demande énergétique est élevée quand le gisement est faible et quand le gisement est fort, la demande est faible, bref ce sont des profils opposés. Une étude par calculs a été faite afin de vérifier si l'excès d'énergie était cohérent pour Djibo et Saint-Hubert pour le système photovoltaïque pour une résidence. Le détail de ces calculs est défini au Tableau 5.11 pour Saint-Hubert et au Tableau 5.12 pour Djibo. Pour Saint-Hubert, on aurait en moyenne, par calculs, 63 % d'excès d'énergie si on considère un système de panneaux qui peut répondre au cas du pire mois et pour Djibo, ce serait environ 49 %. HOMER propose un système avec près de 74 % d'excès d'énergie pour Saint-Hubert et avec 51 % d'excès d'énergie pour Djibo. Les résultats

sont similaires, mais pas identiques donc les systèmes évalués par HOMER pourraient être plus optimisés au niveau de l'excès d'énergie. Ceci s'explique puisque le logiciel HOMER optimise le système en fonction des coûts sur un système entier et non pas par rapport à l'excès d'énergie produit par le système.

Tableau 5.11 Calculs d'excès d'énergie pour Saint-Hubert pour le système photovoltaïque pour une résidence moyenne

	CONSO TOTALE	Énergie fournie avec panneaux max	**Excès p/r à énergie produite**
	kWh/j	kWh/j	**%**
Janvier	84.43	91	**8**
Février	74.70	146	**49**
Mars	62.60	209	**70**
Avril	46.61	258	**82**
Mai	33.07	295	**89**
Juin	29.63	324	**91**
Juillet	29.08	319	**91**
Août	30.06	284	**89**
Septembre	29.11	218	**87**
Octobre	38.66	138	**72**
Novembre	54.59	84	**35**
Décembre	73.96	74	**0**
	min	74	0
	max	324	91
	moy	203	**63**

Tableau 5.12 Calculs d'excès d'énergie pour Djibo pour le système photovoltaïque pour une résidence moyenne

	CONSO TOTALE	Énergie fournie avec panneaux max	**Excès p/r à énergie produite**
	kWh/j	kWh/j	**%**
Janvier	84.43	84	**0**
Février	74.7	99	**25**
Mars	62.6	105	**41**
Avril	46.61	107	**56**
Mai	33.07	108	**69**
Juin	29.63	102	**71**
Juillet	29.08	98	**70**
Août	30.06	99	**70**
Septembre	29.11	100	**71**
Octobre	38.66	98	**61**
Novembre	54.59	92	**41**
Décembre	73.96	86	**14**
	min	84	0
	max	108	71
	moy	98	**49**

Le Tableau 5.13 permet de comparer les systèmes nécessaires à Djibo et à Saint-Hubert pour réponde à la consommation énergétique de laquelle la proportion du chauffage a été retirée. Cette étude avec la consommation sans chauffage a été faite dans le but de déterminer si c'était le gisement ou la consommation qui entraînait un si grand excès d'énergie. En enlevant la proportion du chauffage de la consommation totale, on obtient une demande énergétique plus nivelée. Pour Saint-Hubert la proportion du surplus d'énergie est très similaire à celle pour le cas du la consommation totale (74 % vs 70 %), j'en déduis donc que dans ce cas ce serait le gisement qui influence grandement le surplus d'énergie. Pour Djibo, on observe une nette diminution de la proportion d'excès d'énergie entre le cas de la consommation totale (51 % d'excès d'énergie) et le cas sans chauffage (33 %), donc dans le cas de Djibo, ce serait la demande énergétique qui affecte plus le surplus d'énergie. Au niveau des coûts, la différence entre Saint-Hubert et Djibo est sensiblement la même sauf pour les coûts d'opération qui sont en très grande partie liés au

système de batteries. Ceci est explicable puisque, pour Djibo avec une consommation nivelée, le gisement est suffisant pour remplir un bon nombre de batteries tout en ayant un moins grand nombre de panneaux, ainsi le nombre de batteries à Djibo est similaire à celui de Saint-Hubert. On peut aussi remarquer que bien que la consommation ait diminuée de 60 %, le COE en $/kWh n'a diminué que de 13 % pour Djibo et 9 % pour Saint-Hubert, alors bien que la consommation soit plus faible et nivelée, les économies du système en terme de $/kWh produit ne sont pas significatifs ce qui pourrait dire que le COE en $/kWh produit est plutôt lié au gisement qu'à la demande énergétique.

Tableau 5.13 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très ensoleillé sous HOMER avec la consommation sans chauffage d'une résidence pour le système photovoltaïque

Conso sans chauffage scaled, scaled à 19.5 : moy : 19.5 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
PV seul (DHOMER) St-Hubert	23kWc, 56*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	130908	2437	162063	1.782	70.3
PV seul (DHOMER) Djibo	7kWc, 40*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	54956	2337	84833	0.933	32.8
	Comparaison en % :	-58	-4	-48	-48	-53

Pour le Tableau 5.14, la situation de consommation sans chauffage et en utilisant des appareils efficaces a été étudiée pour Djibo et Saint-Hubert. En passant de la consommation sans chauffage à la consommation sans chauffage et en utilisant des appareils efficaces, l'excès d'énergie a grandement diminué pour Saint-Hubert passant de 70 % à 59 %, alors que pour Djibo la proportion de surplus d'énergie est restée stable de 33 % à 29 %. Pour un lieu avec de grands écarts de gisement solaire au fil de l'année comme Saint-Hubert, le gisement est plus influent pour de grandes consommations gardant ainsi la proportion de surplus d'énergie importante, alors que pour de petites consommations, la diminution de la demande énergétique entraîne une diminution de la proportion du surplus d'énergie. La relation semble inverse pour un lieu comme Djibo pour lequel le gisement solaire est similaire tout au long de l'année, pour de grandes consommations, l'importance de la demande énergétique ou du caractère erratique de la demande influence beaucoup la proportion du surplus d'énergie, alors que pour des demandes de profils similaires plus faibles, la diminution de la demande énergétique affecte peu la proportion du surplus d'énergie.

Tableau 5.14 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très ensoleillé sous HOMER avec la consommation sans chauffage et avec l'utilisation d'appareils efficaces d'une résidence pour le système photovoltaïque

Conso sans chauffage scaled, scaled 11.7 (appareils efficaces), moy : 11.7 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
PV seul (DHOMER) St-Hubert	10kWc,56*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	76240	2388	106762	1.957	58.9
PV seul (DHOMER) Djibo	4kWc,28*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	34404	1340	51534	0.944	29.4
	Comparaison en % :	-55	-44	-52	-52	-50

5.2.3 Comparaison entre Saint-Hubert et un lieu très venteux

Une comparaison entre Saint-Hubert du Québec et Drogden du Danemark (lieu très venteux) a été faite. Tout comme pour le système photovoltaïque, j'ai donc imposé la même consommation pour les 2 lieux afin de voir l'effet de l'ensoleillement sur le dimensionnement et les coûts du système. Cette comparaison a été faite pour les trois profils de consommation pour une résidence dans le cas du système éolien.

Pour les données de gisement éolien, en moyenne, Drogden offre 78 % de plus de vent que Saint-Hubert (Tableau 5.15).

Tableau 5.15 Moyenne de gisement éolien pour Saint-Hubert et Drogden

	Saint-Hubert en m/s	**Drogden en m/s**	**Différence**
Moyenne	4.446	7.936	78%

Les systèmes installés requis pour les 2 lieux sont détaillés dans le Tableau 5.16. Le système à Drogden nécessite 54 % moins d'éoliennes que celui installé à Saint-Hubert, c'est donc un peu plus faible que pour la différence de gisement entre les 2 lieux (78 %). Au niveau des coûts, les coûts initiaux sont de 47 % moins élevés pour Drogden ainsi que le coût de l'énergie par kWh, alors que le coût total et les coûts d'opération sont de 46 % moins élevés. Les 2 lieux ont le même pourcentage d'excès d'énergie.

Tableau 5.16 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très venteux sous HOMER avec la consommation moyenne d'une résidence pour le système éolien

Conso totale, moy : 48.88 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost ($/an)**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
Éolien seul St-Hubert	13*2kW éol, 65*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	122543	6494	205559	0.903	68.9
Éolien seul Drogden	6*2kW éol, 40*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	65368	3492	110006	0.483	68.2
	Comparaison en % :	-47	-46	-46	-47	-1

Rappelons que les coûts d'opération comprennent globalement les frais d'opération et d'entretien en plus des coûts en carburant (ici, nul) et des frais de remplacement d'équipement, tout ceci remis en un coût par année; on y enlève aussi le prix récupéré de l'équipement qui n'est pas à sa fin de vie à la fin du projet. Drogden nécessite 38 % moins de batteries et les coûts d'opération sont diminués de 46 %. Les Tableau 5.17 et Tableau 5.18 présentent le détail des coûts d'opération pour le système à Djibo et à Saint-Hubert.

Tableau 5.17 Détail des coûts d'opération pour le système éolien à Drogden pour une résidence moyenne

	Remplacement	**O&M**	**Fuel**	**Salvage**	**Operating costs**
Éolienne	1,175	720	0	-219	1676
Batteries	1,653	243	0	-221	1675
Onduleur	166	6	0	-31	141
Système	2,994	969	0	-471	3492

Tableau 5.18 Détail des coûts d'opération pour le système éolien à Drogden pour une résidence moyenne

	Remplacement	**O&M**	**Fuel**	**Salvage**	**Operating costs**
Éolienne	2,546	1,560	0	-474	3632
Batteries	2,686	395	0	-360	2721
Onduleur	166	6	0	-31	141
Système	5,398	1,961	0	-864	6495

Le Tableau 5.19 permet de comparer les systèmes nécessaires à Drogden et à Saint-Hubert pour réponde à la consommation énergétique de laquelle la proportion du chauffage a été retirée. Pour Saint-Hubert la proportion du surplus d'énergie est très similaire à celle pour le cas du la

consommation totale (69 % vs 68 %), j'en déduis donc que dans ce cas ce serait le gisement qui influence grandement le surplus d'énergie. Pour Drogden, on observe une certaine diminution de la proportion d'excès d'énergie entre le cas de la consommation totale (68 % d'excès d'énergie) et le cas sans chauffage (62 %), donc dans le cas de Drogden, la demande énergétique affecterait le surplus d'énergie. Au niveau des coûts, la différence entre Saint-Hubert et Drogden a nettement diminué passant de 46-47 % pour le cas de la consommation totale à entre 24 et 30 % pour le cas sans chauffage. Pour Saint-Hubert, ce serait le gisement qui affecte le surplus d'énergie alors que pour Drogden ce serait aussi selon le profil de consommation qui affecterait la proportion de surplus d'énergie. On peut aussi remarquer que bien que la consommation ait diminuée de 60 %, le COE en $/kWh n'a diminué que de 16 % pour Saint-Hubert et ce coût à augmenté de 14 % pour Drogden, alors bien que la consommation soit plus faible et nivelée, les économies du système en terme de $/kWh produit ne sont pas significatifs et on obtient même une augmentation pour Drogden, ce qui pourrait dire que le COE en $/kWh produit dans le cas de Saint-Hubert est plutôt lié au gisement qu'à la demande énergétique, alors que pour Drogden, le profil de consommation semble avoir une influence.

Tableau 5.19 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très venteux sous HOMER avec la consommation sans chauffage d'une résidence pour le système éolien

Conso sans chauffage scaled, scaled à 19.5 : moy : 19.5 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
Éolien seul St-Hubert	5*2kW éol, 16*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	41408	2162	69048	0.759	67.7
Éolien seul Drogden	3*2kW éol, 15*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	28871	1652	49993	0.549	61.7
	Comparaison en % :	-30	-24	-28	-28	-9

Pour le Tableau 5.20, la situation de consommation sans chauffage et en utilisant des appareils efficaces a été étudiée pour Drogden et Saint-Hubert. En passant de la consommation sans chauffage à la consommation sans chauffage et en utilisant des appareils efficaces, la proportion de surplus d'énergie est restée stable à 68 % pour Saint-Hubert et a augmenté pour Drogden de 62 % à 73 %.

Tableau 5.20 Comparaison de Saint-Hubert et d'un lieu très venteux sous HOMER avec la consommation sans chauffage et avec l'utilisation d'appareils efficaces d'une résidence pour le système éolien

Conso sans chauffage scaled, scaled 11.7 (appareils efficaces), moy : 11.7 kWh/j						
Type de système	**Résumé du système**	**Initial cost**	**Operating cost**	**Total NPC**	**COE $/kWh**	**Excès d'énergie (%)**
Éolien seul St-Hubert	3*2kW éol, 15*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	27953	1490	46995	0.861	67.7
Éolien seul Drogden	2*2kW éol, 10*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	19766	1024	32862	0.602	73.3
	Comparaison en % :	-29	-31	-30	-30	8

5.2.4 Validation avec les fichiers disponibles dans HOMER ou RETScreen

Il était prévu qu'une validation soit faite en utilisant les fichiers disponibles dans HOMER et dans RETScreen, cependant le manque de détails sur les informations entrées dans les fichiers ne permet pas de faire une bonne comparaison avec les fichiers créés pour ce projet. De plus pour les systèmes photovoltaïques, le coût des panneaux a diminué substantiellement ces dernières années et si l'année de référence du fichier n'est pas indiquée, il est difficile de comparer encore une fois le coût des systèmes. Des analyses de sensibilités ont donc été faites.

CHAPITRE 6 ÉTUDE COMPARATIVE DES SYSTÈMES SEULS, HYBRIDES AUTONOMES ET HYBRIDES CONNECTES AU RÉSEAU

6.1 Études des systèmes seuls avec HOMER et RETScreen

Les systèmes seuls (photovoltaïque, éolien et diésel) sont étudiés tout d'abord avec le logiciel HOMER et les résultats issus du cas étudié avec la consommation totale sont ensuite comparés à une simulation RETScreen.

6.1.1 Systèmes seuls avec HOMER

Les systèmes seuls (photovoltaïque, éolien et diésel) sont comparés les uns aux autres pour les 3 cas de consommation étudiés. Dans le Tableau 6.1, les systèmes seuls qui répondent à la consommation totale sont détaillés. Le système photovoltaïque demande un coût initial très important, le coût total en est donc affecté et le coût par kWh est élevé. Pour le système éolien, le coût initial est largement moins élevé que pour celui du système photovoltaïque, mais les coûts d'opération sont tout de même élevé, en plus des batteries qui sont une grande partie des coûts d'opération, les éoliennes nécessitent plus d'entretien que les panneaux solaires. Le système diésel quant à lui nécessite un investissement initial minimal et la majeure partie du coût total du système provient des coûts d'opération qui sont majoritairement liés à l'utilisation de carburant. Les systèmes éolien et photovoltaïque ont tous deux une proportion d'excès d'énergie similaires importantes alors que le système diésel est plutôt bien adapté pour l'utilisation de toute l'énergie produite. Les systèmes éolien et diésel offrent un coût similaire par kWh produit.

Tableau 6.1 Résumé des systèmes simples étudiés avec HOMER pour Saint-Hubert pour la consommation totale de 48,88kWh/j

Type de système	Résumé du système	Initial cost	Operating cost ($/an)	Total NPC	COE $/kWh	Excès d'énergie (%)
PV seul (DHOMER)	65kWc, 195*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	392553	8434	500362	2.199	73.6
PV seul (DRET)	60kWc, 195*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	371853	8424	479534	2.107	73.8
Éolien seul	13*2kW éol, 65*200Ah (2.4kWh), 6kW CONV	122543	6494	205559	0.903	68.9
Diesel seul	5kW GEN	6000	14298	188772	0.829	5.85

Le Tableau 6.2 représente le sommaire des systèmes seuls pour le cas de la consommation sans chauffage. Le profil de consommation est plus lissé et la consommation est réduite de 60 %, les systèmes nécessaires sont donc moins importants. Les systèmes d'énergies renouvelables ont un prix de revient de l'énergie qui est diminuée par rapport au cas de la consommation totale. Pour le système photovoltaïque, la diminution est de 19 % et pour le système éolien, 16 %. Le coût COE est le même pour le système diésel. Le surplus d'énergie pour chaque système est similaire dans les 2 cas. La répartition des autres coûts pour chacun des systèmes (coûts initiaux, coûts d'opération et coûts totaux) est la similaire à celle pour la situation de la consommation totale.

Tableau 6.2 Résumé des systèmes simples étudiés avec HOMER pour Saint-Hubert pour la consommation totale de 19,5kWh/j

Conso sans chauffage scaled, scaled à 19.5 : moy : 19.5 kWh/j

Type de système	Résumé du système	Initial cost	Operating cost	Total NPC	COE $/kWh	Excès d'énergie (%)
PV seul (DHOMER)	23kWc, 56*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	130908	2437	162063	1.782	70.3
PV seul (DRET)	22kWc, 51*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	123733	2226	152187	1.674	71.6
Éolien seul	5*2kW éol,16*200Ah (2.4kWh), 2kW CONV	41408	2162	69048	0.759	67.7
Diesel seul	2kW GEN	2400	5623	74282	0.816	1.78

Au Tableau 6.3, le dernier cas de consommation est présenté. Pour le photovoltaïque, le prix de revient a légèrement augmenté alors que la proportion d'excès d'énergie a diminué. Pour le système éolien, le prix de revient a aussi augmenté, mais la proportion de surplus d'énergie est restée la même. Pour le système diésel, le coût de revient a diminué légèrement et la proportion d'excès d'énergie est toujours faible. La répartition des autres coûts pour chacun des systèmes est elle-aussi similaire aux cas précédents.

Tableau 6.3 Résumé des systèmes simples étudiés avec HOMER pour Saint-Hubert pour la consommation totale de 11,7kWh/j

Conso sans chauffage scaled, scaled 11.7 (appareils efficaces), moy : 11.7 kWh/j

Type de système	Résumé du système	Initial cost	Operating cost	Total NPC	COE $/kWh	Excès d'énergie (%)
PV seul (DHOMER)	10kWc,56*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	76240	2388	106762	1.957	58.9
PV seul (DRET)	13kWc,32*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	74092	1389	91848	1.683	71.1
Éolien seul	3*2kW éol,15*200Ah (2.4kWh), 1kW CONV	27953	1490	46995	0.861	67.6
Diesel seul	1kW GEN	1200	3011	39688	0.727	0.39

6.1.2 Comparaison des résultats des systèmes seuls de HOMER et RETScreen

Pour le cas de la consommation totale, une simulation RETScreen a été faite pour les 3 systèmes simples : photovoltaïque, éolien et diésel. Les mêmes données entrées dans HOMER ont été entrées dans RETScreen (Figure 6.1, Figure 6.2 et Figure 6.3). Le coût de revient par année du système avec RETScreen est de 39 142$ qui est le même coût que pour HOMER. Au niveau du graphique des flux monétaires (à droite dans la Figure 6.1), on est à un peu moins de 1 000 000$ pour le coût total du système. Le coût total de HOMER est le *Net Present Cost* (500 362$) qui est différent du coût total de RETScreen (25ans*39 142$= 978 550$) représenté sur le graphique. Si on calcule la valeur future (capitalisée du système), on obtient que le système vaudra 2 147 489$ dans 25 ans. De cette valeur, on peut trouver les annuités qui seraient de 39 147$, donc la valeur de HOMER. Cette valeur multipliée par 25 ans donne la valeur de RETScreen.

Analyse financière

Paramètres financiers			
Taux d'inflation	%	0.0%	
Durée de vie du projet	an	25	
Ratio d'endettement	%	100%	
Taux d'intérêt sur la dette	%	6.00%	
Durée de l'emprunt	an	25	
Coûts d'investissement			
Système de production d'électricité	$	392,553	100.0%
Autre	$	0	0.0%
Total des coûts d'investissement	$	392,553	100.0%
Encouragements et subventions	$	0	0.0%
Frais annuels et paiements de la dette			
Coûts (économies) d'exploitation et entretien	$	1,320	
Coût en combustible - cas proposé	$	0	
Paiements de la dette - 25 ans	$	30,708	
Remplacement pièce - salvage value	$	7,114	
Total des frais annuels et paiements de la dette	$	39,142	
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence	$	0	
Autre	$	0	
Total des économies et des revenus annuels	$	0	
Viabilité financière			
TRI avant impôt - capitaux propres	%	négatif	
TRI avant impôt - actifs	%	négatif	
Retour simple	an	-46.5	
Retour sur les capitaux propres	an	immédiat	

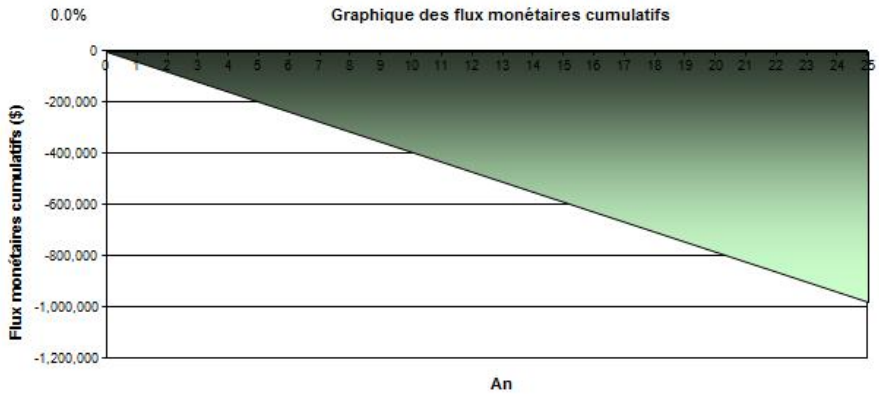


Figure 6.1 Analyse financière RETScreen pour la consommation totale pour le système photovoltaïque seul à Saint-Hubert

Le coût de revient par année du système avec RETScreen est de 16 081$ qui est le même coût que pour HOMER. Au niveau du graphique des flux monétaires (à droite dans la Figure 6.2), on est à un peu plus de 400 000$ pour le coût total du système. Le coût total de HOMER est le *Net Present Cost* (205 559$) qui est différent du coût total de RETScreen (25ans*16 081$= 402 025$) représenté sur le graphique. Si on calcule la valeur future (capitalisée du système), on obtient que le système vaudra 882 233$ dans 25 ans. De cette valeur, on peut trouver les annuités qui seraient de 16 080$, donc la valeur de HOMER. Cette valeur multipliée par 25 ans donne la valeur de RETScreen.

Analyse financière

Paramètres financiers			
Taux d'inflation	%	0.0%	
Durée de vie du projet	an	25	
Ratio d'endettement	%	100%	
Taux d'intérêt sur la dette	%	6.00%	
Durée de l'emprunt	an	25	
Coûts d'investissement			
Système de production d'électricité	$	122,543	100.0%
Autre	$	0	0.0%
Total des coûts d'investissement	$	122,543	100.0%
Encouragements et subventions	$	0	0.0%
Frais annuels et paiements de la dette			
Coûts (économies) d'exploitation et entretien	$	1,961	
Coût en combustible - cas proposé	$	0	
Paiements de la dette - 25 ans	$	9,586	
Replacement pièce - salvage value	$	4,534	
Total des frais annuels et paiements de la dette	$	16,081	
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence	$	0	
Autre	$	0	
Total des économies et des revenus annuels	$	0	
Viabilité financière			
TRI avant impôt - capitaux propres	%	négatif	
TRI avant impôt - actifs	%	négatif	
Retour simple	an	-18.9	
Retour sur les capitaux propres	an	immédiat	

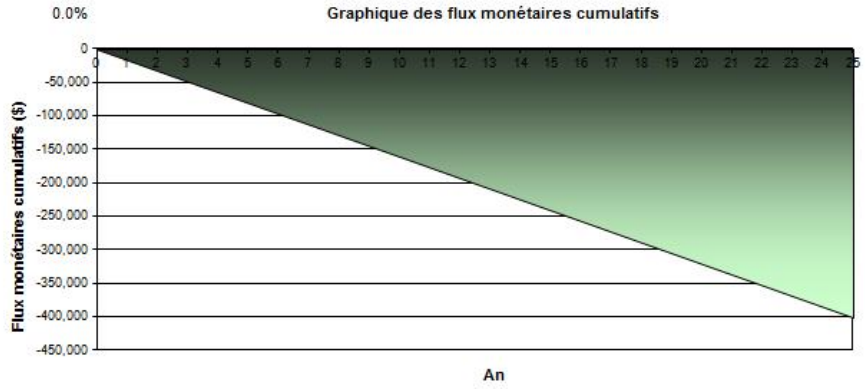


Figure 6.2 Analyse financière RETScreen pour la consommation totale pour le système éolien seul à Saint-Hubert

Le coût de revient par année du système avec RETScreen est de 13 074$ qui est similaire au coût de HOMER de 14 767$. Au niveau du graphique des flux monétaires (à droite dans la Figure 6.3), on est à un peu plus de 325 000$ pour le coût total du système. Le coût total de HOMER est le *Net Present Cost* (188 772$) qui est différent du coût total de RETScreen (25ans*13 074$= 326 850$) représenté sur le graphique. Il y a une différence pour le coût en combustible qui est annuellement de 9 880$ dans HOMER et que de 8 187$ dans RETScreen en entrant une consommation spécifique (15 409kJ/kWh) équivalente à celle entrée dans HOMER. Si on entre une consommation spécifique de 18 600kJ/kWh dans RETScreen, on obtient les mêmes coûts de combustible qu'HOMER. Vu le manque d'informations fournies par l'aide de RETScreen, on ne sait pas comment RETScreen prend en compte la consommation spécifique.

Analyse financière

Paramètres financiers			
Taux d'inflation	%	0.0%	
Durée de vie du projet	an	25	
Ratio d'endettement	%	100%	
Taux d'intérêt sur la dette	%	6.00%	
Durée de l'emprunt	an	25	
Coûts d'investissement			
Système de production d'électricité	$	6,000	100.0%
Autre	$	0	0.0%
Total des coûts d'investissement	$	6,000	100.0%
Encouragements et subventions	$	0	0.0%
Frais annuels et paiements de la dette			
Coûts (économies) d'exploitation et entretien	$	1,095	
Coût en combustible - cas proposé	$	8,187	
Paiements de la dette - 25 ans	$	469	
Remplacement piece - salvage value	$	3,323	
Total des frais annuels et paiements de la dette	$	13,074	
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence	$	0	
Autre	$	0	
Total des économies et des revenus annuels	$	0	
Viabilité financière			
TRI avant impôt - capitaux propres	%	négatif	
TRI avant impôt - actifs	%	négatif	
Retour simple	an	-0.5	
Retour sur les capitaux propres	an	immédiat	

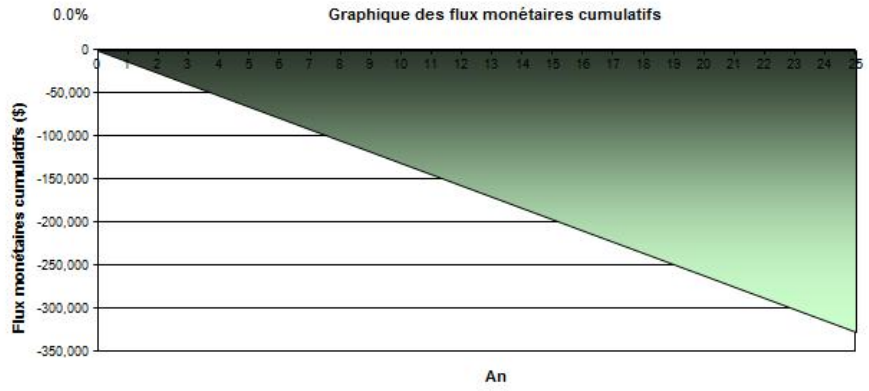


Figure 6.3 Analyse financière RETScreen pour la consommation totale pour le système diésel seul à Saint-Hubert

Si on calcule la valeur future (capitalisée du système), on obtient que le système vaudra 810 185$ dans 25 ans. De cette valeur, on peut trouver les annuités qui seraient de 14 767$, donc la valeur de HOMER. Cette valeur multipliée par 25 ans donne la valeur de RETScreen.

6.2 Systèmes hybrides

6.2.1 Systèmes hybrides avec analyses de sensibilité avec consommation totale

En considérant la consommation totale d'une résidence moyenne, les différents systèmes hybrides en situation hors réseau comprenant des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries et une génératrice ont été analysés. La Figure 6.4 montre les systèmes en ordre : du plus économique au moins économique selon le NPC (*Net Present Cost*).

Sensitivity variables

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 1 ReD2 Capital Multiplier 1 6FM200D Capital Multiplier 1

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	5	3	10	6	$ 44,758	5,129	$ 110,319	0.485	0.85	1,815	2,718
1	4	3	10	6	$ 42,898	5,316	$ 110,854	0.487	0.81	2,035	3,083
7		4	15	6	$ 47,973	8,872	$ 161,385	0.709	0.44	4,580	5,268
6	10		45	6	$ 117,243	5,072	$ 182,084	0.800	1.00		
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
3	6	5		6	$ 59,508	10,140	$ 189,130	0.831	0.79	4,625	5,680
	8	5		6	$ 59,088	10,281	$ 190,509	0.837	0.82	4,407	5,402
7		5		6	$ 40,068	12,087	$ 194,578	0.855	0.37	6,832	7,484
		5	5	6	$ 14,123	14,672	$ 201,681	0.886	0.00	8,231	8,758
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

Figure 6.4 Analyse des systèmes hors réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

On remarque donc que le meilleur système serait celui éolien, diésel et batteries et le deuxième meilleur serait le système hybride comprenant toutes les composantes possibles éoliennes, panneaux photovoltaïques, génératrice diésel et batteries. Les deux pires systèmes sont les systèmes éolien seul avec batteries et photovoltaïque seul avec batteries. Le système diésel seul n'est pas, au fil des ans, la solution la plus économique à choisir. Le système éolien-photovoltaïque avec batteries vient après les systèmes avec génératrice diésel et batteries ensemble à l'exception de la génératrice et des batteries seules. Le Tableau 6.4 montre une analyse de sensibilité sur le coût des batteries en conservant le coût des autres équipements fixes et il présente l'analyse avec un coût de batteries à l'achat de 25 % plus faible et 15 % plus élevé.

Tableau 6.4 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût des batteries

Modification du coût des batteries et coûts des autres équipements fixes

15% de plus du coût initial des batteries

Sensitivity variables

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 1 ReD2 Capital Multiplier 1 6FM200D Capital Multiplier 1.15

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	5	3	10	6	$ 45,669	5,143	$ 111,418	0.489	0.85	1,724	2,548
1	5	3	10	6	$ 49,809	4,870	$ 112,064	0.492	0.87	1,562	2,304
7		4	15	6	$ 49,339	8,952	$ 163,780	0.719	0.45	4,475	5,136
6	10		45	6	$ 121,340	4,831	$ 183,093	0.804	1.00		
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
3	6	5		6	$ 59,508	10,140	$ 189,130	0.831	0.79	4,625	5,680
	8	5		6	$ 59,088	10,281	$ 190,509	0.837	0.82	4,407	5,402
7		5		6	$ 40,068	12,087	$ 194,578	0.855	0.37	6,832	7,484
		5	5	6	$ 14,578	14,645	$ 201,792	0.886	0.00	8,231	8,758
	13		65	6	$ 128,461	6,494	$ 211,477	0.929	1.00		
65			195	6	$ 410,308	8,434	$ 518,117	2.277	1.00		

25% de moins du coût initial des batteries

Sensitivity variables

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 1 ReD2 Capital Multiplier 1 6FM200D Capital Multiplier 0.75

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	5	3	20	6	$ 47,793	4,779	$ 108,878	0.478	0.88	1,289	1,856
1	4	3	20	6	$ 45,933	4,939	$ 109,066	0.479	0.85	1,528	2,242
9		4	25	6	$ 58,529	8,048	$ 161,409	0.709	0.56	3,662	4,114
7	8		60	6	$ 109,383	4,365	$ 165,182	0.726	1.00		
	10		95	6	$ 108,337	6,062	$ 185,825	0.817	1.00		
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
3	6	5		6	$ 59,508	10,140	$ 189,130	0.831	0.79	4,625	5,680
	8	5		6	$ 59,088	10,281	$ 190,509	0.837	0.82	4,407	5,402
7		5		6	$ 40,068	12,087	$ 194,578	0.855	0.37	6,832	7,484
		5	5	6	$ 13,364	14,601	$ 200,020	0.878	0.00	8,232	8,759
65			195	6	$ 362,962	6,689	$ 448,468	1.971	1.00		

En comparaison avec la situation initiale, l'augmentation du coût de 15 % des batteries n'affecte pas le classement des différents systèmes, alors qu'en diminuant de 25 % ce même coût, le système éolien avec batteries passe de l'avant-dernier rang au 5e rang. En somme, la variation du coût des batteries dans ce cas influence peu le classement de système donc les systèmes à prioriser.

Au Tableau 6.5, une analyse similaire est faite en faisant varier le coût des éoliennes.

Tableau 6.5 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût des éoliennes

Modification du coût des éoliennes

15% de plus du coût initial des éoliennes

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 1 ReD2 Capital Multiplier 1.15 6FM200D Capital Multiplier 1

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	4	3	10	6	$ 42,358	5,704	$ 115,272	0.506	0.78	2,223	3,353
1	4	3	10	6	$ 46,498	5,412	$ 115,677	0.508	0.81	2,035	3,083
7		4	15	6	$ 47,973	8,872	$ 161,385	0.709	0.44	4,580	5,268
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
7	9		50	6	$ 126,518	5,246	$ 193,582	0.850	1.00		
7		5		6	$ 40,068	12,087	$ 194,578	0.855	0.37	6,832	7,484
7	1	5		6	$ 46,968	11,555	$ 194,685	0.855	0.51	6,252	7,228
	1	5		6	$ 17,988	14,050	$ 197,594	0.868	0.23	7,658	8,756
		5	5	6	$ 14,123	14,672	$ 201,681	0.886	0.00	8,231	8,758
	13		65	6	$ 134,243	7,154	$ 225,693	0.992	1.00		
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

25% de moins du coût initial des éoliennes

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 1 ReD2 Capital Multiplier 0.75 6FM200D Capital Multiplier 1

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	5	3	10	6	$ 37,258	4,929	$ 100,272	0.440	0.85	1,815	2,718
1	5	3	10	6	$ 41,398	4,673	$ 101,139	0.444	0.86	1,665	2,499
7		4	15	6	$ 47,973	8,872	$ 161,385	0.709	0.44	4,580	5,268
6	10		45	6	$ 102,243	4,674	$ 161,990	0.712	1.00		
	9	5		6	$ 51,588	9,600	$ 174,312	0.766	0.85	4,084	5,000
1	8	5		6	$ 51,228	9,643	$ 174,501	0.766	0.83	4,232	5,193
	13		65	6	$ 103,043	6,325	$ 183,898	0.808	1.00		
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
7		5		6	$ 40,068	12,087	$ 194,578	0.855	0.37	6,832	7,484
		5	5	6	$ 14,123	14,672	$ 201,681	0.886	0.00	8,231	8,758
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

En comparaison avec la situation initiale, l'augmentation du coût de 15 % des éoliennes n'affecte pas le classement des 3 premiers et des 3 derniers systèmes, alors que les positions médianes sont modifiées. Parmi ces positions médianes, les systèmes ayant des éoliennes ont reculés d'une à 2 positions. En diminuant de 25 % le coût des éoliennes, les 4 premières positions et la dernière restent les mêmes par rapport à celle du cas initial, alors que les positions 5 à 10 sont changées. Le système éolien diésel sans batteries a augmenté de 2 positions, le système éolien avec batteries a gagné 3 positions et finalement, le système diésel seul est descendu de 3 positions. En

somme, en faisant varier le coût des éoliennes les 3 premiers systèmes à prioriser restent les mêmes ainsi que le dernier système, celui à éviter reste le photovoltaïque seul avec batteries.

Tableau 6.6 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût des panneaux

Modification du coût des panneaux

15% de plus du coût initial des panneaux

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 1.15 ReD2 Capital Multiplier 1 6FM200D Capital Multiplier 1

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	5	3	10	6	$ 44,758	5,129	$ 110,319	0.485	0.85	1,815	2,718
1	4	3	10	6	$ 43,519	5,316	$ 111,475	0.490	0.81	2,035	3,083
7		4	15	6	$ 52,320	8,872	$ 165,732	0.728	0.44	4,580	5,268
6	10		45	6	$ 120,969	5,072	$ 185,810	0.816	1.00		
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
1	7	5		6	$ 57,849	10,335	$ 189,967	0.834	0.80	4,582	5,627
	8	5		6	$ 59,088	10,281	$ 190,509	0.837	0.82	4,407	5,402
1		5		6	$ 15,849	14,271	$ 198,281	0.871	0.07	8,092	8,760
		5	5	6	$ 14,123	14,672	$ 201,681	0.886	0.00	8,231	8,758
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
65			195	6	$ 432,918	9,480	$ 554,109	2.435	1.00		

50% de moins du coût initial des panneaux

Diesel Price ($/L) 1.2 PV Capital Multiplier 0.5 ReD2 Capital Multiplier 1 6FM200D Capital Multiplier 1

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
3	4	3	10	6	$ 44,968	4,819	$ 106,576	0.468	0.84	1,759	2,615
	5	3	10	6	$ 44,758	5,129	$ 110,319	0.485	0.85	1,815	2,718
10		4	15	6	$ 39,693	8,200	$ 144,518	0.635	0.55	4,157	4,671
10	8		50	6	$ 104,138	4,758	$ 164,957	0.725	1.00		
10		5		6	$ 31,788	11,305	$ 176,308	0.774	0.47	6,401	6,979
10	1	5		6	$ 37,788	10,851	$ 176,502	0.775	0.59	5,881	6,775
		5			$ 6,000	14,298	$ 188,772	0.829	0.00	8,233	8,760
	8	5		6	$ 59,088	10,281	$ 190,509	0.837	0.82	4,407	5,402
		5	5	6	$ 14,123	14,672	$ 201,681	0.886	0.00	8,231	8,758
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
70			180	6	$ 259,248	8,782	$ 371,511	1.632	1.00		

Au Tableau 6.6, l'analyse de sensibilité est faite pour le coût des panneaux. Une augmentation de 15 % a été considérée et une diminution de 50 % du coût des panneaux étant donné que depuis les dernières années le coût des panneaux ne cesse de diminuer. Pour l'augmentation de 15 %, le classement reste inchangé donc l'augmentation du coût n'a pas d'influence sur les systèmes à prioriser dans ce cas-ci. En imposant une diminution du coût des panneaux de 50 % du coût initial, le système hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries passe de la 2e position au premier rang et les 3 derniers systèmes restent à leur position initiale. Un autre changement de

position est notable, le système photovoltaïque passe du 8e au 5e rang. En somme, même une diminution significative du coût des panneaux améliore peu le sort des systèmes photovoltaïque, cependant le système hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries est à favoriser.

Une autre analyse de sensibilité a été effectuée pour le coût du diésel (Tableau 6.7). Le coût estimé de départ est de 1,2$/L. Les autres coûts analysés sont 1,4$/L, 1,6$/L, 1,8$/L et 2$/L. Pour 1,4$/L pour la diésel, le classement est inchangé pour les 4 premières positions et pour la dernière par rapport à la situation initiale. Pour les positions 5 à 10, globalement les systèmes utilisant le diésel sont descendus d'un à 2 positions et les systèmes n'ayant pas de génératrice diésel ont augmenté d'une à 2 positions. Pour le coût du diésel de 1,6$/L et de 1,8$/L, seules les 6e, 7e, 8e et la dernière place est inchangée. Le premier système à favoriser est donc maintenant le système hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries. Le système éolien avec batteries a fait un bond de la 10e place à la 5e alors que le système diésel seul a subi une chute de la 5e position à la 9e. Les autres systèmes avec une génératrice diésel étudiés ont subi une perte d'une position. Pour 2$/L, les positions 6, 7, 8 et la dernière ne sont toujours pas changées. Le premier système est aussi hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries. Le système éolien-photovoltaïque avec batteries a augmenté d'une place, le système éolien avec batteries de 6 positions et le système photovoltaïque-diésel avec batteries de 3 places. Les autres systèmes avec génératrice diésel ont diminué d'une place. Ces analyses du coût du diésel montrent que dès qu'il y a une augmentation du coût du diésel, le système hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries est à privilégier, alors que le système photovoltaïque avec batteries est toujours à proscrire.

De toutes ces analyses, on en ressort que le système photovoltaïque avec batteries est toujours à proscrire pour la situation étudiée, alors que le système éolien diésel avec batteries est à favoriser même avec une variation du coût des batteries et des éoliennes et même pour une augmentation du coût des panneaux, mais le système hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries est à favoriser pour une diminution du coût des panneaux de 50 % ou encore dès qu'il y a augmentation du coût du diésel. Globalement, les systèmes à envisager sont le système hybride éolien-diésel-photovoltaïque avec batteries dans un futur proche (vu que le coût des panneaux est à la baisse et que le coût du diésel est à la hausse) et le système éolien-diésel avec batteries est un choix pour les systèmes d'aujourd'hui, mais il ne sera pas la solution à long terme.

Tableau 6.7 Analyse de sensibilité pour les systèmes hybrides avec modification du coût du diésel

Modification du coût du diésel

1.4$/L

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	5	3	10	6	$ 44,758	5,568	$ 115,933	0.509	0.85	1,746	2,584
1	5	3	10	6	$ 48,898	5,273	$ 116,303	0.511	0.87	1,585	2,343
8		4	15	6	$ 52,113	9,648	$ 175,441	0.771	0.49	4,300	4,874
6	10		45	6	$ 117,243	5,072	$ 182,084	0.800	1.00		
3	7	5		6	$ 65,508	10,570	$ 200,631	0.881	0.82	4,249	5,218
	8	5		6	$ 59,088	11,162	$ 201,776	0.886	0.82	4,407	5,402
		5			$ 6,000	15,944	$ 209,821	0.922	0.00	8,233	8,760
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
8		5		6	$ 44,208	13,096	$ 211,624	0.929	0.41	6,656	7,276
		5	5	6	$ 14,123	16,318	$ 222,725	0.978	0.00	8,231	8,758
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

1.6$/L

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
1	5	3	15	6	$ 51,933	5,448	$ 121,572	0.534	0.88	1,405	2,003
	5	3	15	6	$ 47,793	5,797	$ 121,903	0.535	0.86	1,586	2,289
6	10		45	6	$ 117,243	5,072	$ 182,084	0.800	1.00		
9		4	25	6	$ 62,323	9,871	$ 188,501	0.828	0.54	3,796	4,146
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
4	7	5		6	$ 69,648	11,072	$ 211,189	0.928	0.83	4,095	5,024
	8	5		6	$ 59,088	12,043	$ 213,044	0.936	0.82	4,407	5,402
8		5		6	$ 44,208	14,428	$ 228,641	1.004	0.41	6,656	7,276
		5			$ 6,000	17,591	$ 230,870	1.014	0.00	8,233	8,760
		5	5	6	$ 14,123	17,966	$ 243,791	1.071	0.00	8,232	8,759
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

1.8$/L

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
2	5	3	15	6	$ 56,073	5,486	$ 126,205	0.554	0.90	1,200	1,681
	6	3	15	6	$ 53,793	5,707	$ 126,749	0.557	0.91	1,202	1,688
6	10		45	6	$ 117,243	5,072	$ 182,084	0.800	1.00		
9		4	25	6	$ 62,323	10,777	$ 200,090	0.879	0.55	3,716	4,076
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
4	7	5		6	$ 69,648	11,891	$ 221,659	0.973	0.83	4,095	5,024
	9	5		6	$ 65,088	12,409	$ 223,721	0.983	0.85	4,084	5,000
9		5		6	$ 48,348	15,429	$ 245,577	1.079	0.44	6,519	7,116
		5			$ 6,000	19,237	$ 251,920	1.106	0.00	8,233	8,760
		5	5	6	$ 14,123	19,610	$ 264,807	1.163	0.00	8,231	8,758
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

2$/L

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
2	5	3	20	6	$ 59,108	5,554	$ 130,102	0.571	0.91	1,034	1,409
	6	3	20	6	$ 56,828	5,796	$ 130,924	0.575	0.92	1,029	1,413
6	10		45	6	$ 117,243	5,072	$ 182,084	0.800	1.00		
	13		65	6	$ 122,543	6,843	$ 210,020	0.923	1.00		
10		4	30	6	$ 69,498	11,230	$ 213,058	0.936	0.60	3,387	3,681
4	8	5		6	$ 75,648	12,214	$ 231,781	1.018	0.86	3,804	4,664
	9	5		6	$ 65,088	13,226	$ 234,162	1.028	0.85	4,084	5,000
9		5		6	$ 48,348	16,732	$ 262,244	1.152	0.44	6,519	7,116
		5			$ 6,000	20,884	$ 272,969	1.199	0.00	8,233	8,760
		5	5	6	$ 14,123	21,259	$ 285,879	1.256	0.00	8,232	8,759
65			195	6	$ 392,553	9,480	$ 513,744	2.258	1.00		

Deux autres analyses détaillées sont effectuées par graphique représentant les zones de systèmes à privilégier pour l'évolution du coût des panneaux en fonction du coût du diésel, les deux coûts sont sujets à changement dans les prochaines années, le coût des panneaux tend à diminuer alors que le coût du carburant tend à augmenter.

Au Tableau 6.8, l'analyse graphique du coût des panneaux est présentée en fonction du coût du diésel et ce pour un coût des éoliennes donné (graphique 1 : 75 % du coût des éoliennes initial, graphique 2 : le coût initial et graphique 3 : pour 115 % du coût initial). Le coût des batteries est fixe. La région 1 représente la zone pour laquelle le système hybride éolien-diésel avec batteries est à prioriser alors que la 2 représente celle pour laquelle le système hybride photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries est à privilégier. On remarque donc que plus le coût des éoliennes augmente, plus la zone du système hybride photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries est grande et qu'il faut un coût élevé des panneaux pour que le système éolien-diésel avec batteries soit à prioriser.

Au Tableau 6.9, l'analyse graphique du coût des panneaux est présentée en fonction du coût du diésel et ce, pour un coût de batteries donné (graphique 1 : 75 % du coût des batteries initial, graphique 2 : le coût initial et graphique 3 : pour 115 % du coût initial). Le coût des éoliennes est fixe. Pour le cas de 75 % du coût des batteries, il faut un coût élevé des panneaux et un faible coût du diésel pour que le système éolien-diésel avec batteries soit à favoriser. Pour le coût initial des batteries, aussitôt que le coût des panneaux est élevé, le système hybride éolien-diésel avec batteries peut être favorisé, cependant pour ce système continue d'être privilégié plus le coût du diésel augmente, il faut que le coût des panneaux soit très élevé. Si le coût des panneaux tend toujours à diminuer dans les prochaines années, le système hybride photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries sera préférable. Lorsque le coût des batteries est de 15 % plus élevé, il faut que le coût des panneaux soit élevé et que le coût du diésel soit faible pour que le système éolien-diésel avec batteries soit favorable. Majoritairement, le système éolien-diésel avec batteries est recommandé.

Tableau 6.8 Analyse graphique du coût des panneaux en fonction du coût du diésel selon l'évolution du coût des éoliennes en conservant le coût des batteries fixe

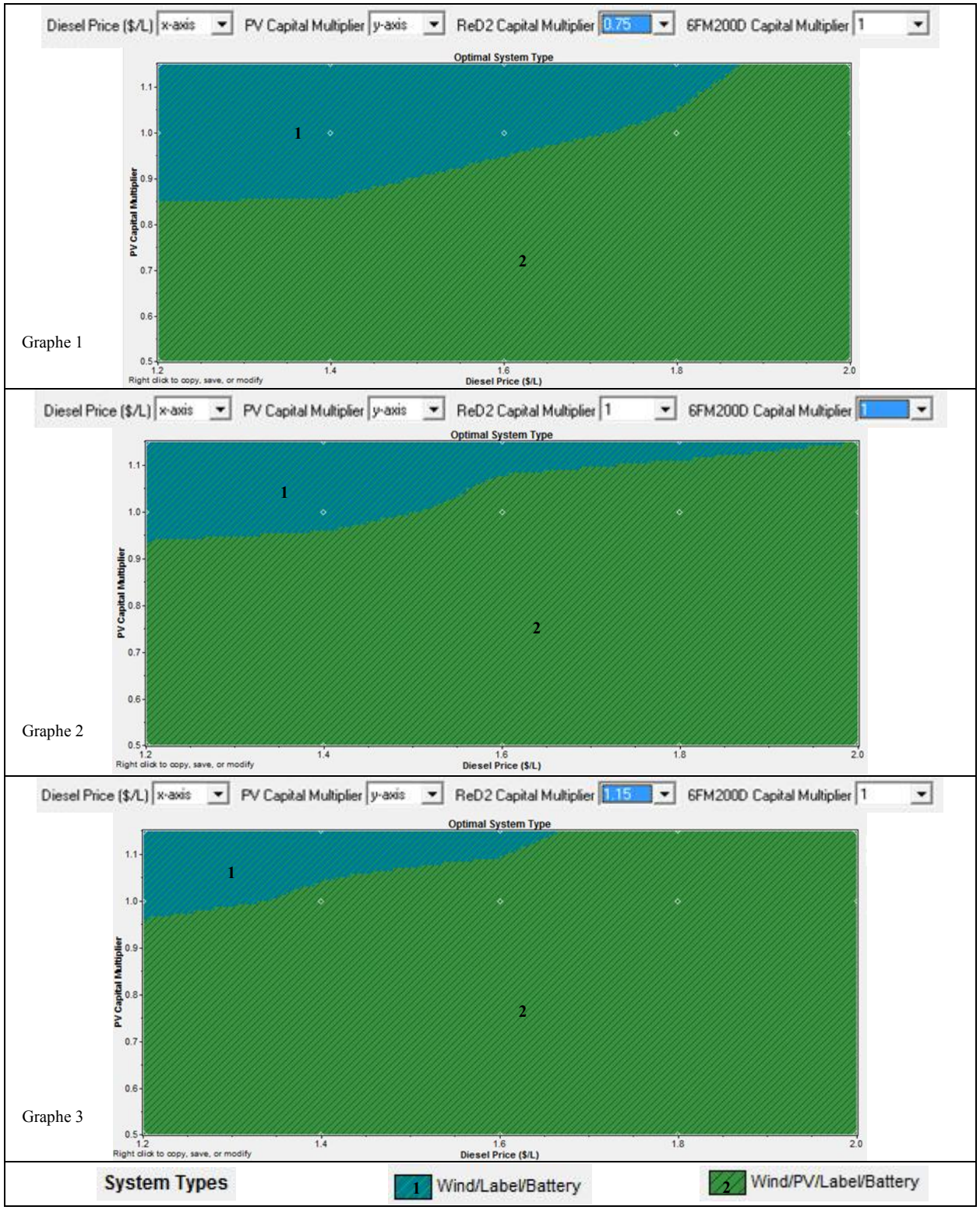
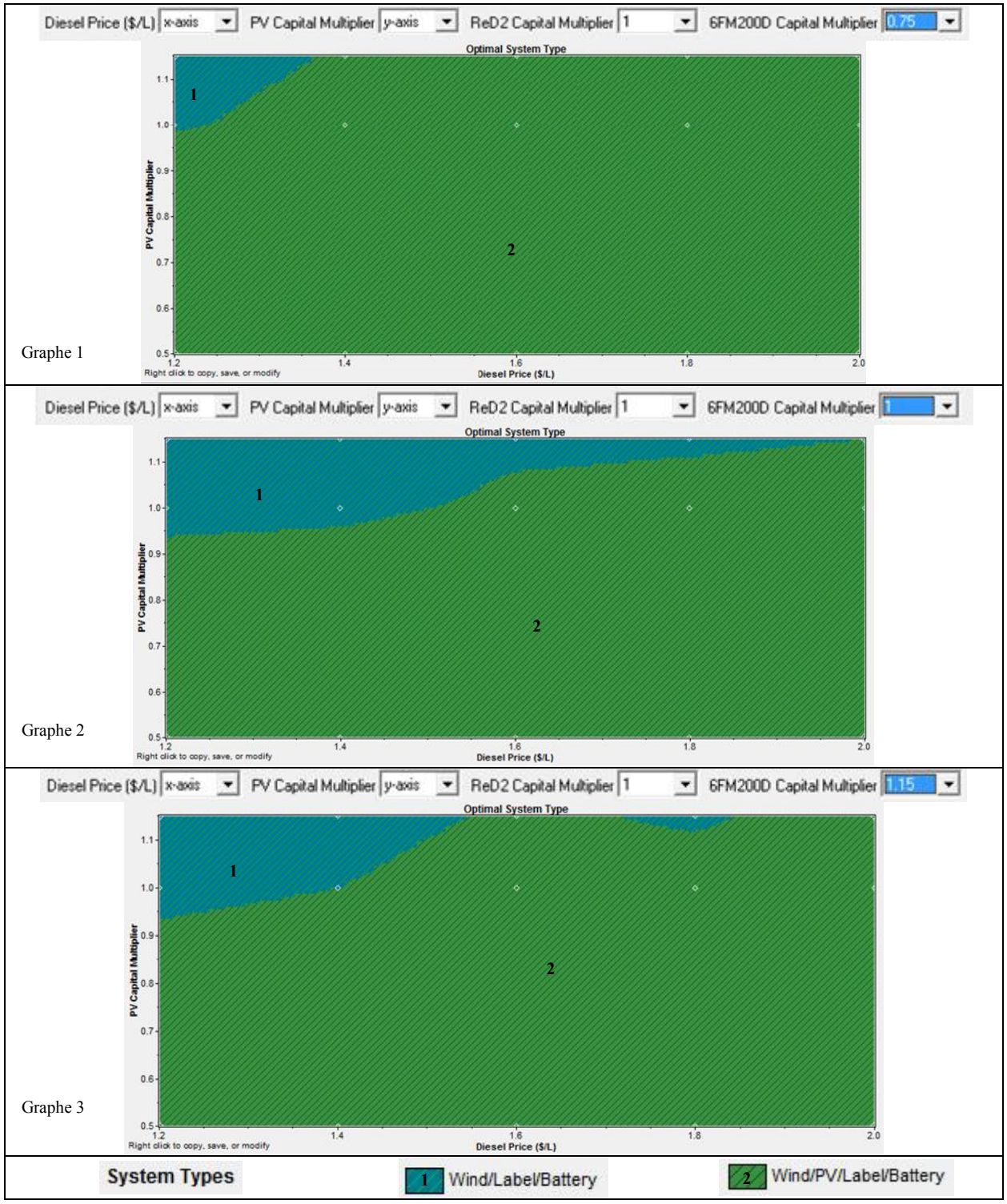


Tableau 6.9 Analyse graphique du coût des panneaux en fonction du coût du diésel selon l'évolution du coût des batteries en conservant le coût des éoliennes fixe



Pour le coût initial estimé des panneaux et des batteries, l'analyse graphique est faite pour le coût des éoliennes en fonction du coût du diésel à la Figure 6.5. Globalement, pour un faible coût du diésel, le système éolien-diésel avec batteries est préférable, alors que pour un coût de diésel élevé le système photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries est suggéré.

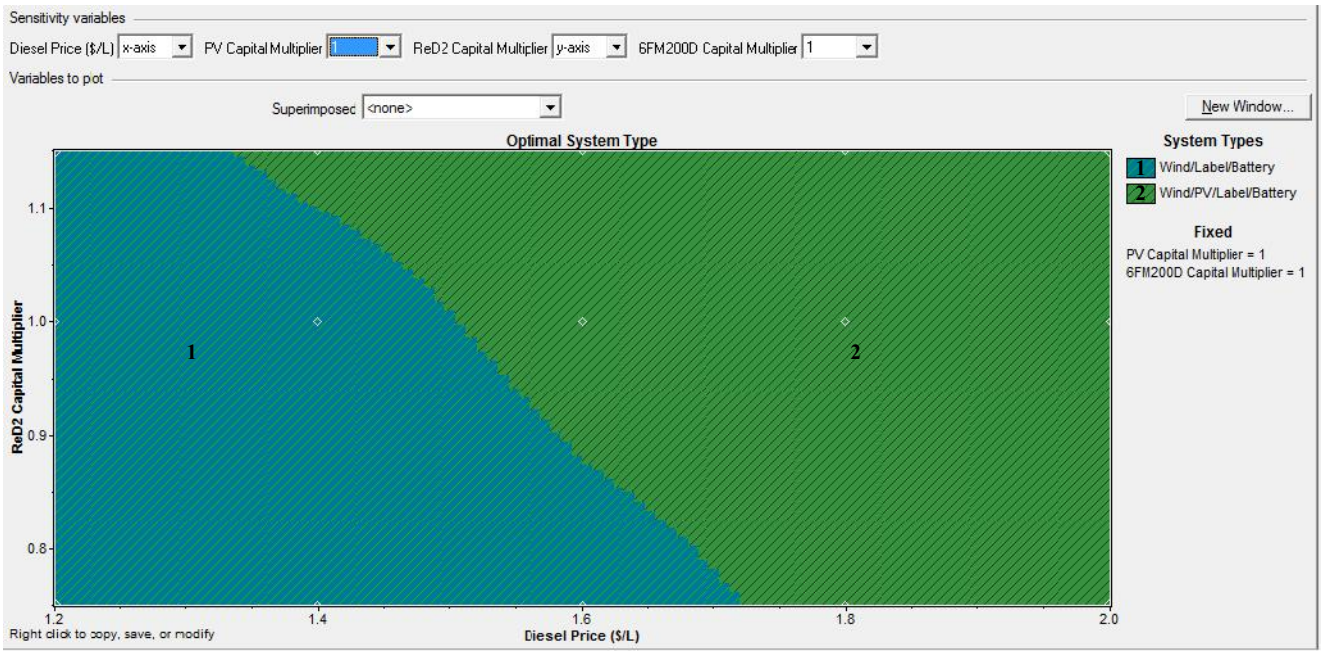


Figure 6.5 Analyse graphique du coût des éoliennes en fonction du coût du diésel en conservant le coût des panneaux et des batteries fixe

Pour le coût initial estimé des éoliennes et des panneaux, l'analyse graphique est faite pour le coût des batteries en fonction du coût du diésel à la Figure 6.6. Sommairement, pour un faible coût du diésel, le système éolien-diésel avec batteries est favorable, alors que pour un coût de diésel élevé le système photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries est recommandé.

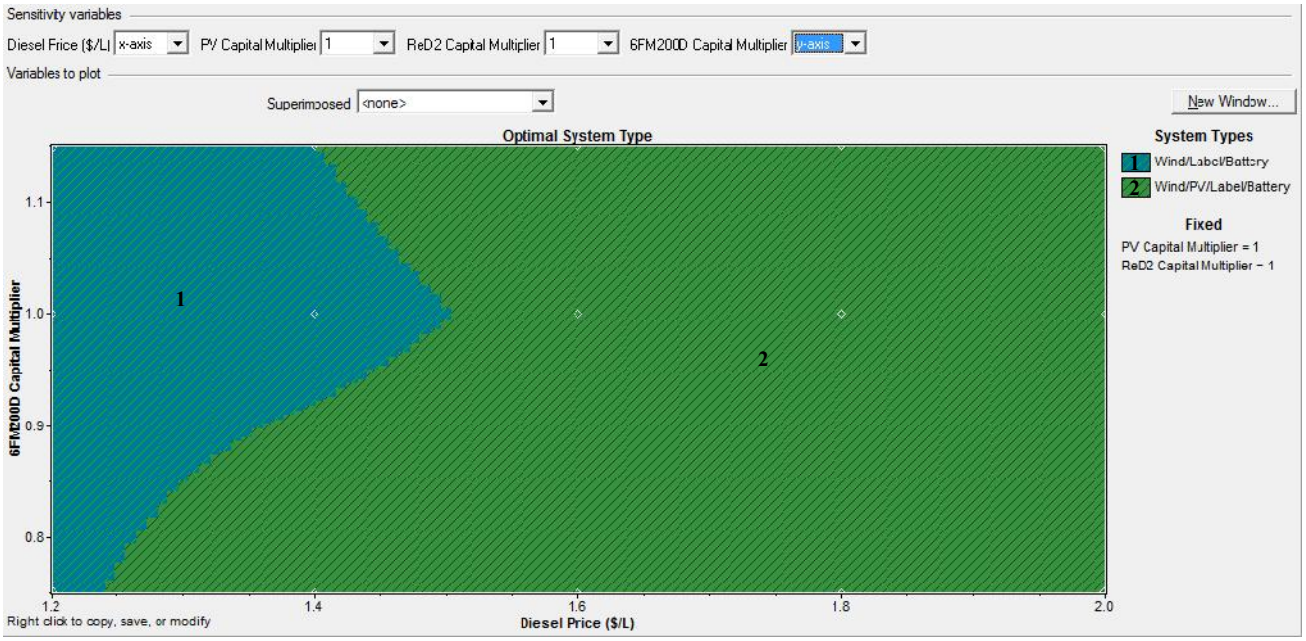


Figure 6.6 Analyse graphique du coût des batteries en fonction du coût du diésel en conservant le coût des panneaux et des éoliennes fixe

Une petite étude a aussi été faite pour le cas du coût des panneaux valant 50 % du coût initial aux Figure 6.7 et Figure 6.8. À la Figure 6.7, le coût des éoliennes est en fonction du coût du diésel alors que pour la Figure 6.8, coût des batteries est présenté en fonction du coût du diésel. Dans les 2 cas, le système photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries est préférable, ce qui veut dire que peut importe l'évolution du coût des batteries, des éoliennes ou du diésel, si le coût des panneaux est diminué des 50 %, le système photovoltaïque-diésel-éolien avec batteries est toujours la solution à privilégier.

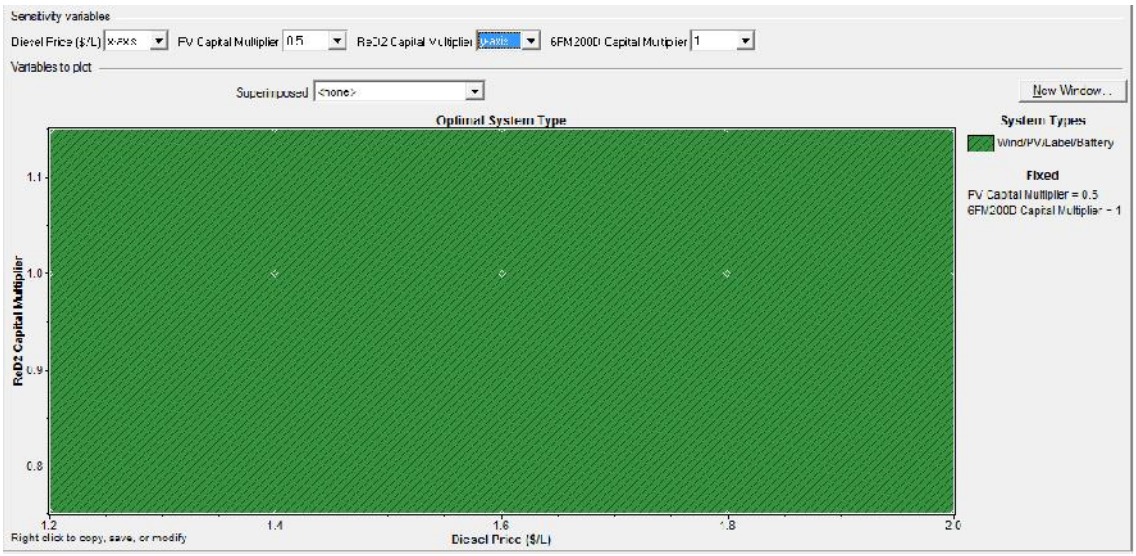


Figure 6.7 Analyse graphique du coût des éoliennes en fonction du coût du diésel en conservant le coût batteries fixe avec le coût des panneaux à 50 %

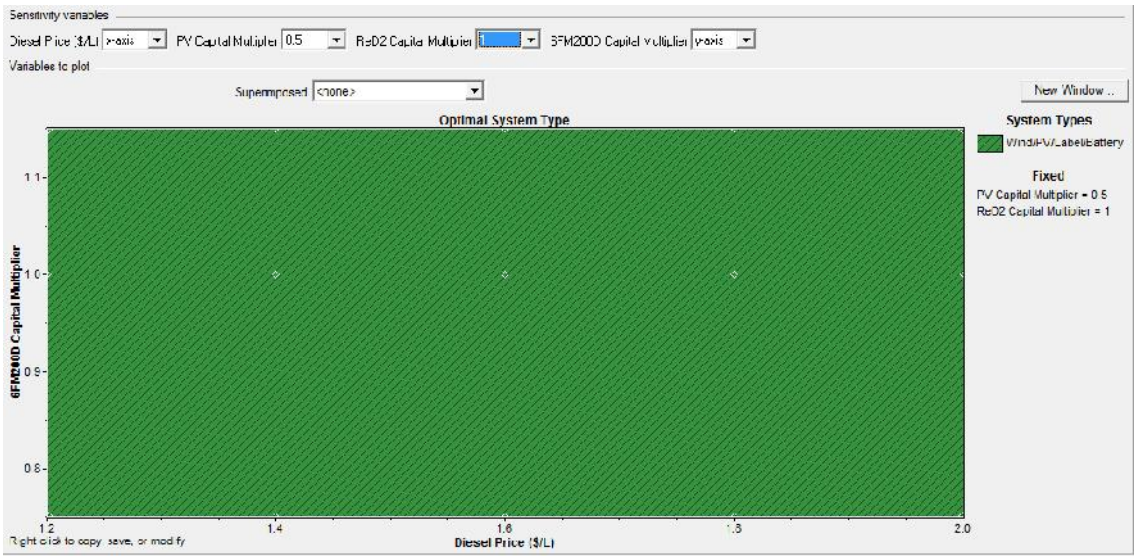


Figure 6.8 Analyse graphique du coût des batteries en fonction du coût du diésel en conservant le coût des éoliennes fixe avec le coût des panneaux à 50 %

6.2.2 Comparaison des systèmes sans génératrice avec ceux connectés au réseau et analyses de sensibilité

6.2.2.1 Étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Dans cette section sont présentées diverses études pour les systèmes photovoltaïques en comparaison avec la situation « connecté au réseau ». Des analyses de sensibilité ont aussi été effectuées.

6.2.2.1.1 Études des systèmes photovoltaïques connectés au réseau avec de multiples possibilités

Le système a été modélisé comme étant connecté au réseau. De nombreuses dimensions du champ de panneaux ont été utilisées pour la simulation. HOMER donne toujours la solution optimisée avec la plus petite puissance du champ de panneaux. Dans le cas de la Figure 6.9, 5kWc était la plus petite puissance de panneaux insérée dans HOMER. Il n'est pas avantageux d'ajouter des panneaux à un système qui est connecté au réseau si les coûts d'électricité et les coûts de rachat ceux présentement offerts au Québec.

Sensitivity variables

Power Price ($/kWh) 0.07 Sellback Rate ($/kWh) 0

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
		5	$ 0	1,247	$ 15,938	0.070	0.00
5	5	5	$ 24,940	1,063	$ 38,534	0.169	0.33

Figure 6.9 Résultats tabulés de l'analyse des systèmes photovoltaïques connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

À la Figure 6.10, l'analyse de sensibilité de ce système est illustrée graphiquement. Les paramètres étudiés sont le prix de rachat de l'électricité au réseau sur l'axe des ordonnées et le coût de l'électricité du réseau sur l'axe des abscisses. La zone 1 est celle pour laquelle le réseau est préférablement alors que dans la zone 2, il devient avantageux d'ajouter des panneaux solaires de 5kWc au système.

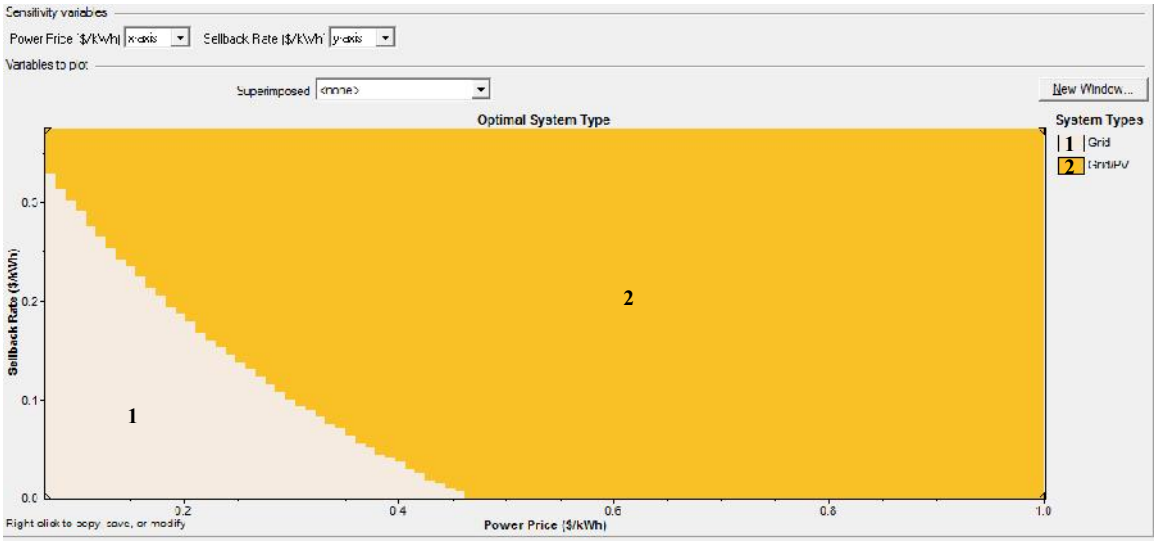


Figure 6.10 Résultats graphiques de l'analyse des systèmes photovoltaïques connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

6.2.2.1.2 Comparaison du système photovoltaïque optimal et la situation « connecté au réseau »

6.2.2.1.2.1 Études du système photovoltaïque seul optimal et celui connecté au réseau

Dans le cas de la Figure 6.11, 65kWc était la puissance de panneaux insérée dans HOMER. Il n'est pas avantageux d'ajouter des panneaux à un système qui est connecté au réseau si les coûts d'électricité et les coûts de rachat ceux présentement offerts au Québec.

Sensitivity variables

Power Price ($/kWh) 0.07 Sellback Rate ($/kWh) 0

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
			5	$ 0	1,247	$ 15,938	0.070	0.00
	195	5	4	$ 122,605	9,519	$ 244,294	1.073	0.00
65		5	5	$ 273,340	933	$ 285,269	1.253	0.90
65	195	5	1	$ 391,705	8,738	$ 503,403	2.211	0.95

Figure 6.11 Résultats tabulés de l'analyse du système photovoltaïque seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

À la Figure 6.12, l'analyse de sensibilité de ce système est détaillée graphiquement. Les paramètres étudiés sont le prix de rachat de l'électricité au réseau sur l'axe des ordonnées et le coût de l'électricité du réseau sur l'axe des abscisses. La zone 1 est celle pour laquelle le réseau

est préférablement alors que dans la zone 2, il devient avantageux d'ajouter des panneaux solaires de 65kWc au système.

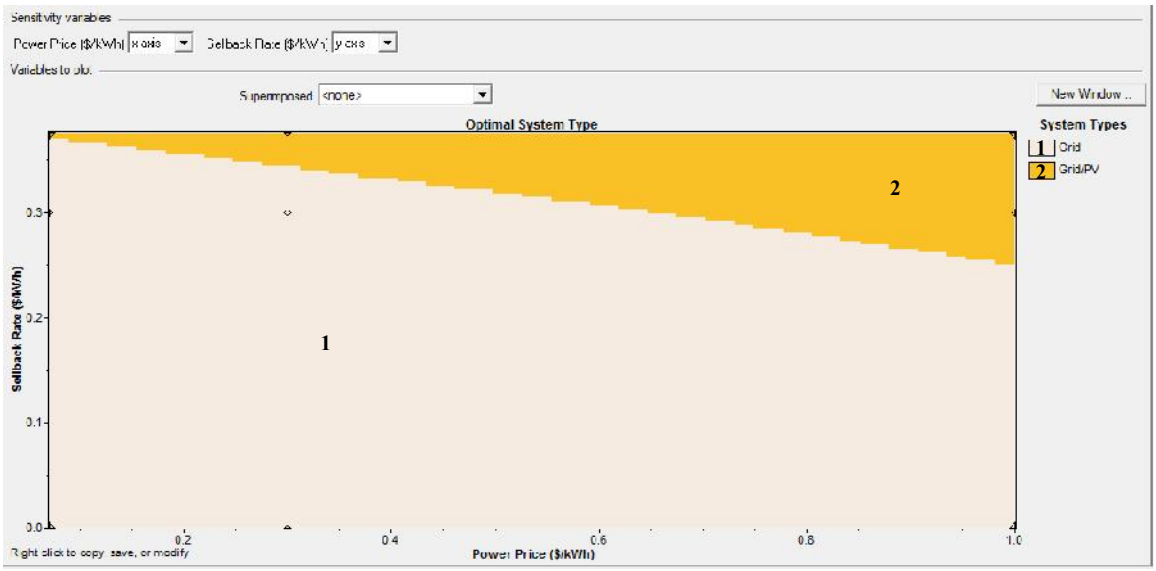


Figure 6.12 Résultats graphiques de l'analyse du système photovoltaïque seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

6.2.2.1.3 Analyse de la distance minimale du réseau pour le seuil de rentabilité pour le système photovoltaïque seul

Le système photovoltaïque optimal est comparé avec la situation connectée au réseau dans le cas où le réseau n'est pas déjà disponible à proximité. La distance de la résidence au réseau à partir de laquelle il devient rentable d'avoir un système autonome photovoltaïque est 56.9 km (Figure 6.13).

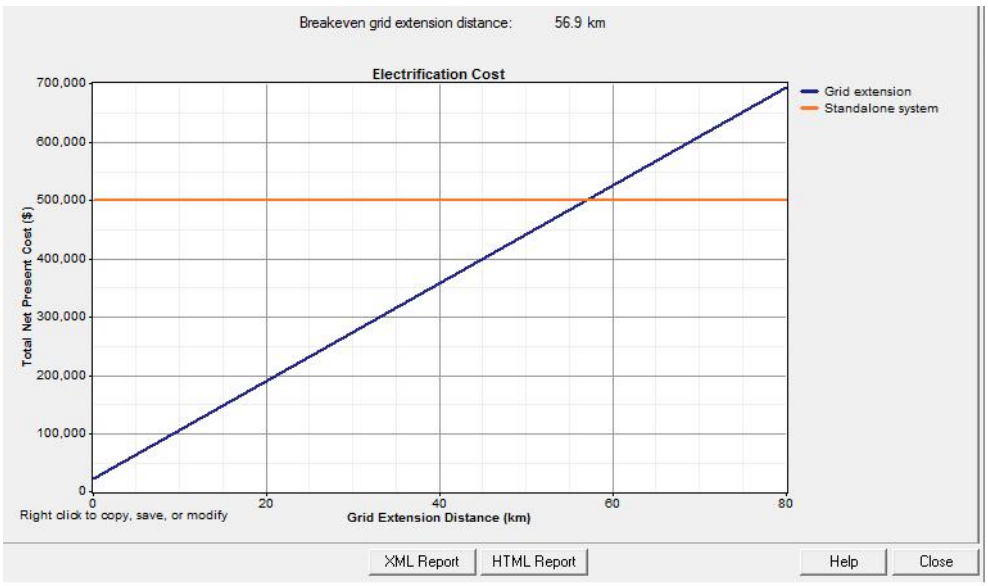


Figure 6.13 Analyse de la distance du réseau pour le seuil de rentabilité du système photovoltaïque en comparaison avec le système connecté au réseau

6.2.2.2 Étude des systèmes éoliens connectés au réseau

Dans cette section sont présentées diverses études pour les systèmes éoliens en comparaison avec la situation « connecté au réseau ». Des analyses de sensibilité ont aussi été effectuées.

6.2.2.2.1 Études des systèmes éoliens connectés au réseau avec toutes les possibilités

Le système a été modélisé comme étant connecté au réseau. De nombreuses quantités d'éoliennes ont été évaluées pour la simulation. HOMER donne toujours la solution optimisée avec le moins d'éoliennes possible. Dans le cas de la Figure 6.14, une éolienne était la quantité analysée dans HOMER. Il n'est pas avantageux d'ajouter des éoliennes à un système qui est connecté au réseau si les coûts d'électricité et les coûts de rachat ceux présentement offerts au Québec.

Sensitivity variables

Rate 1 Power Price ($/kWh) 0.07 Rate 1 Sellback Rate ($/kWh) 0

Double click on a system below for simulation results.

	ReD2	6FM200D	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
				5	$ 0	1,247	$ 15,938	0.070	0.00
	1		5	5	$ 10,240	1,332	$ 27,266	0.120	0.28
		5	5	5	$ 7,275	1,574	$ 27,392	0.120	0.00
	1	5	5	5	$ 13,275	1,541	$ 32,977	0.145	0.28

Figure 6.14 Résultats tabulés de l'analyse des systèmes éoliens connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

À la Figure 6.15, l'analyse de sensibilité de ce système est illustrée graphiquement. Les paramètres étudiés sont le prix de rachat de l'électricité au réseau sur l'axe des ordonnées et le coût de l'électricité du réseau sur l'axe des abscisses. La zone 1 est celle pour laquelle le réseau est préférablement alors que dans la zone 2, il devient avantageux d'ajouter une éolienne au système et la zone 3 représente la zone pour laquelle il est aussi intéressant d'ajouter des batteries en plus de l'éolienne au système. Il faut cependant que le coût de l'électricité du réseau soit très élevé et que le coût de rachat soit faible.

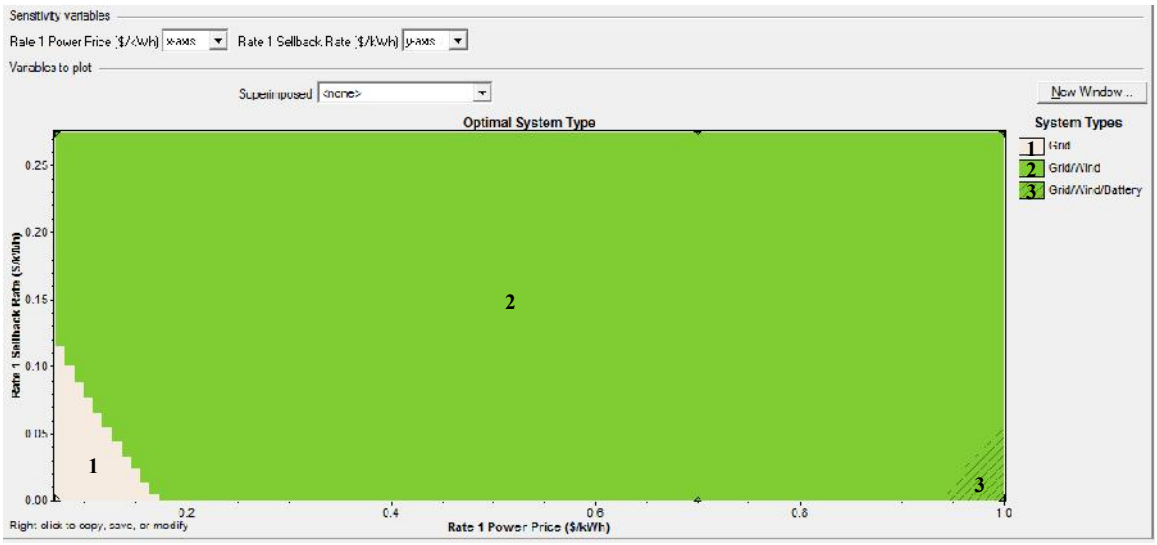


Figure 6.15 Résultats graphiques de l'analyse des systèmes éoliens connectés au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

6.2.2.2.2 Comparaison du meilleur système éolien seul et la situation « connecté au réseau »

6.2.2.2.2.1 Études du système éolien seul et celui connecté au réseau

Dans le cas de la Figure 6.16, 13 éoliennes de 2kW était la puissance de quantité d'éoliennes insérée dans HOMER. Il n'est pas avantageux d'ajouter des éoliennes à un système qui est connecté au réseau si les coûts d'électricité et les coûts de rachat ceux présentement offerts au Québec.

Sensitivity variables

Rate 1 Power Price ($/kWh) 0.07 Rate 1 Sellback Rate ($/kWh) 0

Double click on a system below for simulation results.

ReD2	6FM200D	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
			5	$ 0	1,247	$ 15,938	0.070	0.00
	65	6	5	$ 44,543	4,109	$ 97,066	0.426	0.00
13		6	5	$ 83,088	3,984	$ 134,017	0.589	0.96
13	65	6	0	$ 122,543	6,494	$ 205,559	0.903	1.00

Figure 6.16 Résultats tabulés de l'analyse du système éolien seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

À la Figure 6.17, l'analyse de sensibilité de ce système est détaillée graphiquement. Comme pour le cas du photovoltaïque, les paramètres étudiés sont le prix de rachat de l'électricité au réseau sur l'axe des ordonnées et le coût de l'électricité du réseau sur l'axe des abscisses. La zone 1 est celle pour laquelle le réseau est préférablement alors que dans la zone 2, il devient préférable d'ajouter les éoliennes au système.

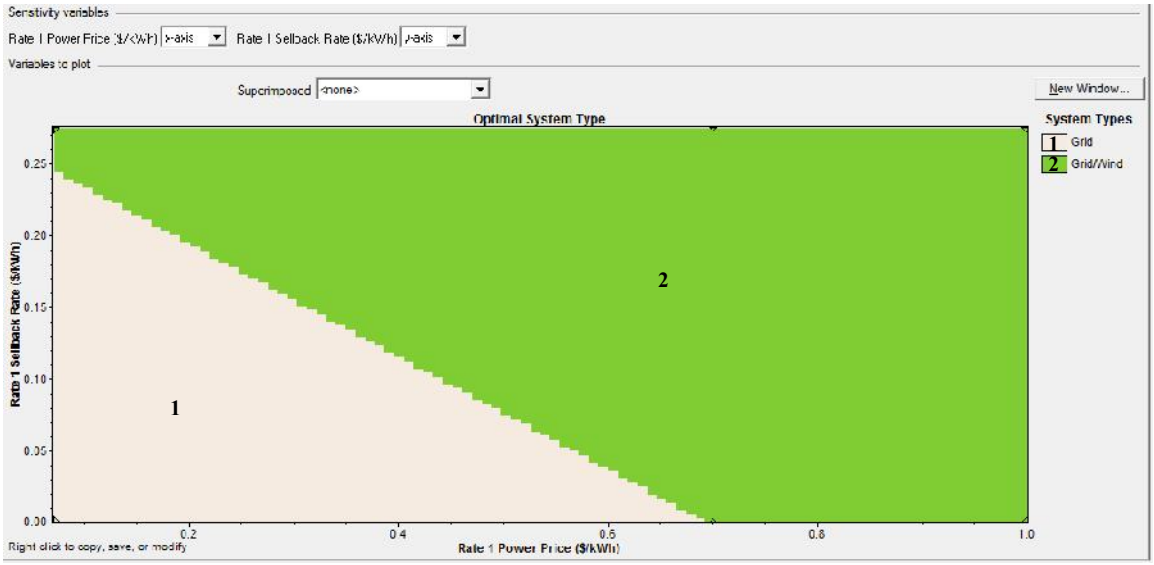


Figure 6.17 Résultats graphiques de l'analyse du système éolien seul optimal connecté au réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

6.2.2.2.2.2 Analyse de la distance étant le seuil minimal de rentabilité pour le système éolien seul

Le système éolien optimal est comparé avec la situation connectée au réseau dans le cas où le réseau n'est pas déjà disponible à proximité. La distance de la résidence au réseau à partir de laquelle il devient rentable d'avoir un système autonome éolien est 22.6 km (Figure 6.18).

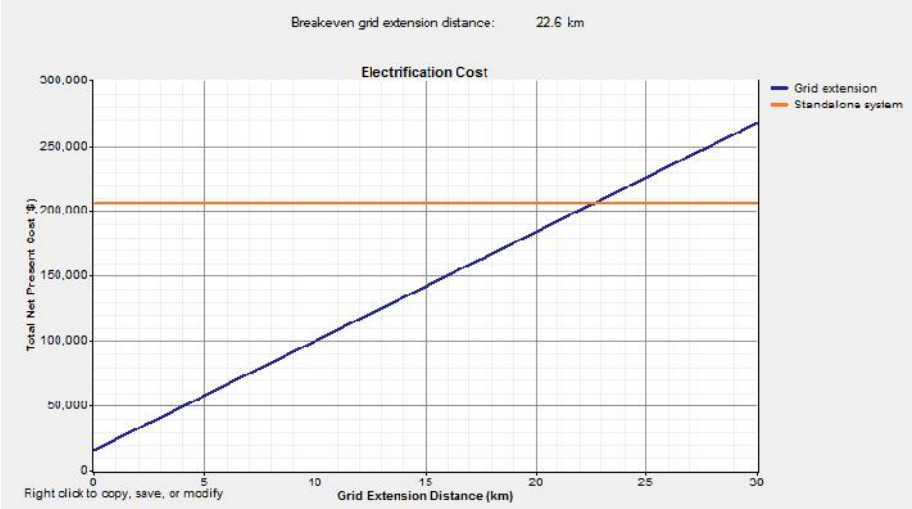


Figure 6.18 Analyse de la distance du réseau pour le seuil de rentabilité du système éolien en comparaison avec le système connecté au réseau

6.2.3 Comparaison des systèmes hybrides avec systèmes connectés au réseau et analyses de sensibilité

En considérant la consommation totale d'une résidence moyenne, les différents systèmes hybrides en situation connectée réseau comprenant des panneaux solaires, des éoliennes et des batteries ont été analysés.

À la Figure 6.19, on remarque qu'encore une fois, si le coût de l'électricité et le prix de rachat sont les mêmes qu'en ce moment, le réseau est la situation à privilégier.

Sensitivity variables

Rate 1 Power Price ($/kWh) 0.07 Rate 1 Sellback Rate ($/kWh) 0

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
			5	$ 0	1,247	$ 15,938	0.070	0.00
1		5	5	$ 8,380	1,284	$ 24,798	0.109	0.07
	1	5	5	$ 10,240	1,332	$ 27,266	0.120	0.28
1	1	5	5	$ 14,380	1,260	$ 30,491	0.134	0.34

Figure 6.19 Résultats tabulés de l'analyse des systèmes, sans génératrice diésel, connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

À la Figure 6.20, la zone 1 représente le réseau alors que la zone 2 est le système combiné du réseau et de l'éolien et finalement, la zone 3 identifie la région pour laquelle le système avec le réseau, l'éolien et les panneaux est abordable. Comme on peut le remarquer, dès qu'il y a une légère augmentation dans le prix de rachat de l'électricité, le système de la zone 3 devient intéressant.

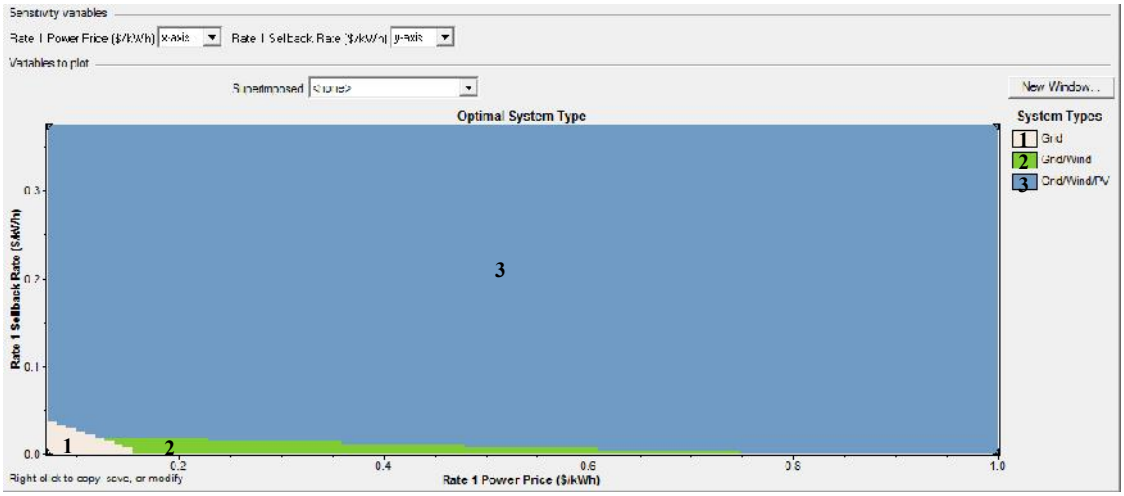


Figure 6.20 Résultats graphiques de l'analyse des systèmes, sans génératrice diésel, connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

En considérant la consommation totale d'une résidence moyenne, les différents systèmes hybrides en situation connectée réseau comprenant des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries et une génératrice ont été analysés.

Rate 1 Power Price ($/kWh) 0.07 Rate 1 Sellback Rate ($/kWh) 0

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	ReD2	Label (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
					10	$ 0	1,247	$ 15,939	0.070	0.00		
		1			10	$ 1,200	1,226	$ 16,866	0.074	0.00		0
	1			6	10	$ 11,088	1,355	$ 28,415	0.125	0.28		
			5	6	10	$ 8,123	1,597	$ 28,542	0.125	0.00		
	1	1		6	10	$ 12,288	1,334	$ 29,343	0.129	0.28		0
		1	5	6	10	$ 9,323	1,576	$ 29,469	0.129	0.00		0
	1		5	6	10	$ 14,123	1,565	$ 34,126	0.150	0.28		
	1	1	5	6	10	$ 15,323	1,543	$ 35,053	0.154	0.28		0
5				6	10	$ 25,788	1,087	$ 39,683	0.174	0.33		
5		1		6	10	$ 26,988	1,066	$ 40,611	0.178	0.33		0
5			5	6	10	$ 28,823	1,296	$ 45,394	0.199	0.33		
5	1			6	10	$ 31,788	1,132	$ 46,261	0.203	0.54		
5		1	5	6	10	$ 30,023	1,275	$ 46,321	0.203	0.33		0
5	1	1		6	10	$ 32,988	1,111	$ 47,189	0.207	0.54		0
5	1		5	6	10	$ 34,823	1,341	$ 51,972	0.228	0.54		
5	1	1	5	6	10	$ 36,023	1,320	$ 52,899	0.232	0.54		0

Figure 6.21 Analyse des systèmes connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

À la Figure 6.22, le coût de rachat est sur l'axe des ordonnées et le prix de l'électricité est sur les abscisses. La zone 1 représente la région pour laquelle le réseau est la meilleure option, la zone 2 celle pour le réseau et une génératrice diésel, la zone 3 celle pour le réseau et l'éolien, la zone 4 celle pour le réseau, l'éolien et une génératrice diésel, la zone 5 celle pour le réseau, l'éolien et le

photovoltaïque et finalement, la zone 6 celle pour le réseau, l'éolien, le photovoltaïque et la génératrice diésel. De façon générale, on remarque que dès que le coût de rachat et le prix de l'électricité sont plus de 0.10$/kWh, le système avec le réseau, l'éolien, le photovoltaïque et la génératrice devient favorable.

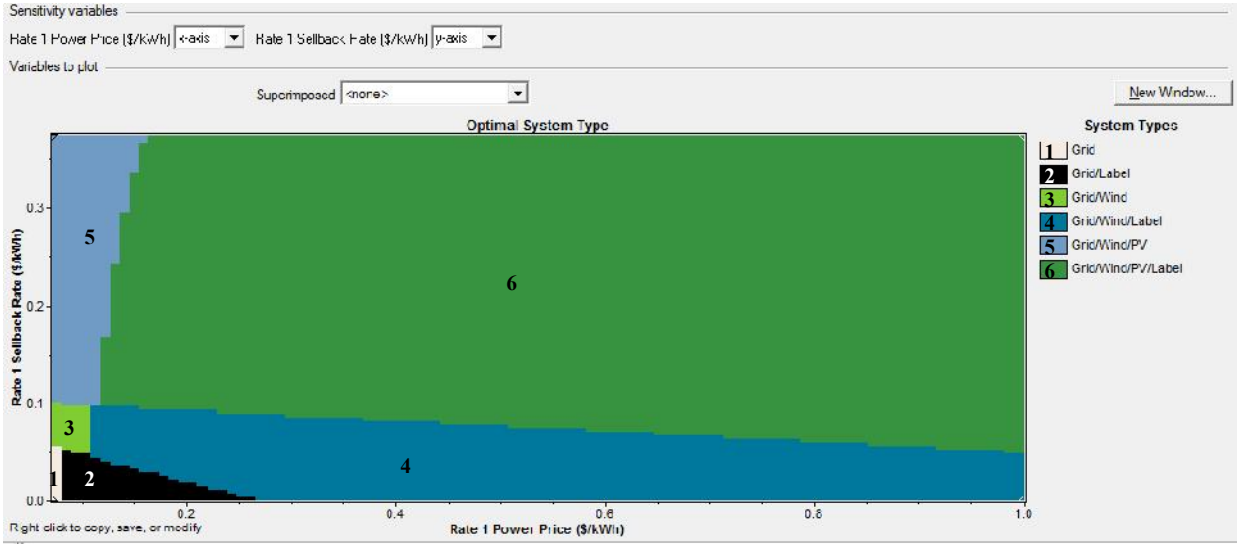


Figure 6.22 Analyse de sensibilité sur le coût de rachat de l'électricité et le prix de l'électricité pour des systèmes connectés réseau pour la consommation d'une maison moyenne avec les coûts évalués initialement

CHAPITRE 7 RÉSULTATS GÉNÉRAUX DES ANALYSES ET DES SIMULATIONS

En faisant un survol de tous les résultats et simulations, on en déduit tout d'abord que le profil de consommation et le gisement ont une influence complexe sur les coûts et l'excès d'énergie, alors que le coût de revient de l'énergie en $/kWh est simplement lié au gisement de la source d'énergie (solaire ou éolienne).

Dans le cas des systèmes seuls autonomes, les coûts initiaux pour le photovoltaïque sont très élevés et le coût de revient d'énergie aussi, alors que pour l'éolien et le diésel, le coût de revient est similaire. La seule différence est issue de la provenance des coûts, le système éolien a des coûts initiaux importants, alors que la génératrice diésel a des coûts en carburant non négligeables.

L'analyse RETScreen pour les coûts donne des résultats équivalents à HOMER en comparant les annuités des différents systèmes.

Pour la comparaison des systèmes hybrides hors réseau, le système éolien-diésel avec batteries est le choix optimal avec les coûts offerts présentement. Si on effectue des analyses de sensibilité sur les différents coûts des équipements, le système photovoltaïque-éolien-diésel avec batteries devient intéressant et le système photovoltaïque avec batteries est toujours bon dernier. Globalement, les systèmes éolien-photovoltaïques sans génératrice performent mieux que les systèmes photovoltaïque et éolien seuls et nécessitent moins de batteries.

Si on étudie la situation connectée au réseau en ajoutant des panneaux solaires ou des éoliennes, par défaut avec les coûts d'électricité présents et le coût de rachat de l'électricité nul, le réseau est favorable, mais si les coûts augmentent l'ajout de panneaux ou d'éoliennes peut devenir rentable.

En faisant la comparaison du système autonome et de la situation connectée au réseau, on obtient pour le système photovoltaïque que le réseau doive être à plus de 57 km pour être intéressant, alors qu'il ne faut que 23 km pour que le système éolien devienne rentable.

Pour la situation connectée au réseau étudiée à la fois avec panneaux solaires et éoliennes sans génératrice diésel, avec une légère augmentation des coûts d'électricité, il devient rentable d'ajouter des éoliennes et des panneaux solaires au système.

Finalement, l'étude du cas connecté au réseau avec les panneaux, les éoliennes, les batteries et la génératrice diésel, on remarque que dès que le coût de rachat est supérieur à 0.10$/kWh et que le coût de l'électricité est d'un peu plus de 0.10$/kWh, le système photovoltaïque-éolien-diésel connecté au réseau devient intéressant.

CONCLUSION

La conclusion générale est donc qu'il est rentable économiquement d'ajouter des éoliennes aux systèmes avec génératrice diésel et si les coûts des équipements ou du diésel évoluent, l'ajout de panneaux solaires à ces systèmes sera justifié. Quand les coûts d'électricité auront légèrement augmenté et que les coûts de rachat de l'électricité par le réseau seront intéressants, l'ajout de panneaux solaires, d'éoliennes et de génératrices diésel au système sera rentable pour le particulier. La distance (23 km pour l'éolien et 57 km pour le photovoltaïque) entre le site de la demande énergétique et le réseau justifie un système isolé et autonome pour la consommation équivalente à une résidence moyenne du Québec.

Voici maintenant un retour sur l'hypothèse principale, les questions et objectifs de recherche et une présentation des nouvelles voies à étudier entourant le sujet de ce mémoire.

Hypothèse principale et vérification. Effectivement, l'ajout d'un système photovoltaïque à un système éolien hors réseau au Québec permet de diminuer l'intermittence du système et donc, de diminuer la quantité d'accumulateurs nécessaires. Cette diminution du nombre d'accumulateurs et de la taille des systèmes installés permet de réaliser des économies qui justifient le surcoût engendré par l'ajout du système photovoltaïque au système éolien.

Questions de recherche. Les questions de recherche ont été résolues :

- *Est-ce qu'en région isolée au Québec, les systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques sont économiquement et techniquement viables en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls?* Oui, ils sont préférables aux systèmes seuls.
- *Est-ce ce que ces mêmes systèmes sont viables en comparaison avec la situation actuelle génératrice diesel ou le réseau ?* Les systèmes hybrides avec génératrice diésel sont préférables au système diésel seul, mais les systèmes hybrides sans génératrice ne sont pas préférables. Pour la situation connectée au réseau, il est rentable d'ajouter des panneaux solaires ou des éoliennes au système si les coûts d'électricité augmentent et si le coût de rachat de l'électricité augmente.
- *Quels logiciels sont reconnus et facilement accessibles (coût, facilité d'utilisation, champ d'application) pour réaliser de telles études ?* Le logiciel HOMER est un outil très fiable, robuste et facile d'utilisation avec de nombreuses possibilités d'analyses.

Objectifs spécifiques. Les objectifs spécifiques du projet ont été atteints :

1. *Identifier au moins deux logiciels nécessaires pour la réalisation du projet* : HOMER et RETScreen,
2. *Sélectionner les sites pour l'étude* : Saint-Hubert pour le Québec, Djibo du Burkina Faso pour son gisement solaire élevé et Drogden au Danemark pour son gisement éolien élevé,
3. *Définir et modéliser les différentes composantes des systèmes à comparer* : des méthodologies ont été développées,
4. *Effectuer la comparaison en tenant compte du côté technique et économique* : le dimensionnement a été réussi pour les équipements des systèmes et les coûts ont été évalués,
5. *Faire une analyse comparative entre les données fournies par les deux logiciels* : l'étude des coûts pour les systèmes seuls a été réalisée avec HOMER et RETScreen.

Objectifs généraux. Les objectifs ont été atteints en comparant des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec des systèmes photovoltaïque ou éolien seuls pour certains sites hors réseau au Québec et par rapport à d'autres sites ailleurs dans le monde. La comparaison avec des systèmes avec des génératrices au diésel et avec la situation connectée au réseau a été faite. Le but de ce mémoire a donc été atteint.

Nouvelles voies à étudier. Des études similaires pourraient être faites pour différents lieux au Québec, et même dans d'autres pays. Des analyses de sensibilité pourraient être réalisées au niveau des différentes technologies de panneaux solaires et avec différentes éoliennes. Il pourrait y avoir une analyse détaillée avec les autres consommations, consommation sans chauffage et consommation en utilisant des appareils électriques efficaces et une comparaison des résultats avec la présente étude afin de déterminer si les conclusions sont maintenues ou si le profil de consommation apporte du changement. Dans ce rapport, le dimensionnement, donc la dimension technique, a été abordé et l'analyse économique sur toute la durée de vie du projet, mais il pourrait y avoir une analyse sociale et environnementale sur les systèmes étudiés dans ce mémoire. Il pourrait y avoir des recherches qui mèneraient à des méthodologies de dimensionnement pratique pour les systèmes seuls et hybrides qui pourraient alimenter et enrichir

la littérature déficiente à ce sujet. Au niveau des données de gisement, avec les statistiques déjà accumulées, il pourrait être intéressant de ne pas fournir simplement le nombre possible de jours consécutifs sans soleil, mais aussi le nombre de jours consécutifs sans vent et surtout, le nombre de journées consécutives sans soleil ni vent, ces données faciliteraient le dimensionnement des appareils et les études préliminaires à l'implantation des technologies solaires photovoltaïques, éoliennes et hybrides.

Apport de ce mémoire. J'espère avoir apporté des conclusions intéressantes pour ceux qui veulent installer des systèmes autonomes en régions isolées et d'avoir soulevé des questions ou nouvelles pistes de recherche pertinentes au domaine. Ce mémoire, surtout les parties sur la méthodologie et sur les données à utiliser, a été réalisé de façon à ce que des étudiants puissent intégrer et utiliser ces notions dans les projets de cours notamment pour les cours ENE8210 - Efficacité des sources d'énergie et MET8220 - Technologies solaires photovoltaïques. Pour moi, la transmission des connaissances est très importante et elle est d'autant plus cruciale dans les domaines émergents comme l'utilisation des énergies renouvelables non traditionnelles et plus globalement, dans la perspective du développement durable afin de sensibiliser la relève aux nouvelles voies et solutions qui s'ouvrent à eux.

LISTE DES RÉFÉRENCES

Ai, B., Yang, H., Shen, H., & Liao, X. (2003). Computer-aided design of PV/wind hybrid system. *Renewable Energy, 28*(10), 1491-1512.

Bernard, J. (2004). *Énergie solaire : calculs et optimisation*. Paris: Ellipses.

Cabral, A. (2007). *Développement durable et gestion environnementale*. Notes de cours GCI520. Université de Sherbrooke. Sherbrooke.

Canada, R. n. (2010). Tableaux de la Base de données complète sur la consommation d'énergie. *L'Office de l'efficacité énergétique*. Retrieved 29 novembre, 2011, from http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/evolution_res_qc.cfm

CanmetÉnergie. (2009). Énergies renouvelables. *CanmetÉnergie*. Retrieved 29 novembre, 2011, from http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/energies_renouvelables/rescer.html

Celik, A. N. (2002). Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic-wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. *Energy Conversion and Management, 43*(18), 2453-2468.

Cunty, G. (2001). *Éoliennes et aérogénérateurs: guide de l'énergie éolienne* (Nouvelle ed.). Aix-en-Provence: Edisud.

Dalton, G. J., Lockington, D. A., & Baldock, T. E. (2008). Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel. *Renewable Energy, 33*(7), 1475-1490. doi: 10.1016/j.renene.2007.09.014

Deshmukh, M. K., & Deshmukh, S. S. (2008). Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*(1), 235-249.

Dubois, C. (2009). *Le guide de l'éolien : techniques et pratiques*. Paris: Eyrolles.

Ekren, O., & Ekren, B. Y. (2008). Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy, 85*(11), 1086-1101.

Energy, U. S. D. o. (2011, 2011). Building Energy Software Tools Directory. Retrieved 29 novembre, 2011, from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=renewable_energy

Fox, B. (2009). *Énergie éolienne et intégration au réseau*. Paris: Dunod.

Fthenakis, V. M., Alsema, E. A., & De Wild-Scholten, M. J. (2005). *Life cycle assessment of photovoltaics: Perceptions, needs, and challenges*, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.

Funabashi, T., Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., & Urasaki, N. (2007). Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. *Renewable Energy, 32*(11), 1917-1933. doi: 10.1016/j.renene.2006.09.003

Funk, D. (2010). *L'énergie solaire : circonstances et conditions d'exploitation au Québec.* Maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Goralczyk, M. (2003). Life-cycle assessment in the renewable energy sector. *Applied Energy, 75*(3-4), 205-211.

Himri, Y., Boudghene Stambouli, A., Draoui, B., & Himri, S. (2008). Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy, 33*(7), 1128-1136.

Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy, 30*(11-12 SPEC ISS), 2042-2056.

Hongxing, Y., Wei, Z., & Chengzhi, L. (2008). Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system. *Applied Energy, 86*(2), 163-169.

Hydro-Québec. Préserver la qualité de l'air. *Développement durable*. Retrieved 11 Mars, 2009, from http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/environnement/pres_qual_utiliser.html

Hydro-Québec. (2009). Géothermie : Appui financier. *Outils et programmes pour économiser*. Retrieved 8 avril, 2009, from http://www.hydroquebec.com/residentiel/geothermie/appui.html

Ito, M., Kato, K., Komoto, K., Kichimi, T., & Kurokawa, K. (2008). A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 16*(1), 17-30.

Jacquet, P., & Tubiana, L. (2006). *Regards sur la terre (2007) : l'annuel du développement durable*. Paris.

Jungbluth, N. (2005). Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 13*(5), 429-446.

Jungbluth, N., Dones, R., & Frischknecht, R. (2008). *Life cycle assessment of photovoltaics: Update of the ecoinvent database*, Warrendale, PA 15086, United States.

Kaldellis, J. K., Kavadias, K. A., & Koronakis, P. S. (2007). Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers. *Renewable & Sustainable Energy Reviews, 11*(1), 57-77. doi: 10.1016/j.rser.2004.12.001

Kannan, R., Leong, K. C., Osman, R., Ho, H. K., & Tso, C. P. (2006). Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore. *Solar Energy, 80*(5), 555-563.

Labouret, A., & Villoz, M. (2005). *Énergie solaire photovoltaïque* (2e éd. -- ed.). Paris: Dunod.

Le Gouriérès, D. (1980). *Energie éolienne : théorie, conception et calcul pratique des installations*. Paris: Eyrolles.

Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Hoboken: Wiley.

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained : theory, design, and application* (2nd ed.). Chichester, U.K.: John Wiley and Sons.

Mathew, S. (2006). *Wind energy : fundamentals, resource analysis and economics*. Berlin, [Allemagne]: Springer.

Patel, M. R. (2006). *Wind and solar power systems : design, analysis and operation* (2nd ed.). Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis.

Poissant, Y. Field assessment of novel pv module technologies in Canada. *CanmetENERGY, Natural Resources Canada*.

Rapin, M., & Noël, J.-M. (2010). *L'énergie éolienne : principes, études de cas*. Paris: Dunod : ADEME.

Ressources naturelles Canada. (2006). Perspectives énergétiques du Canada : scénario de référence de 2006. *Perspectives énergétiques du Canada : scénario de référence de 2006*. Retrieved 11 mars, 2009, from http://www.nrcan-rncan.gc.ca/com/resoress/publications/peo/peo-fra.php

RNCREQ. (2009). Chalets et lieux de villégiature :Guide des énergies renouvelables.

Rosa, A., Delchet, K., & Aubrun-Vadrot, M. (2005). *Guide pratique du développement durable : un savoir-faire à l'usage de tous*. Saint-Denis La Plaine.

Ross, M., & Royer, J. (1999). *Photovoltaics in cold climates*. London, UK: James & James.

Shibasaki, M., Warburg, N., & Eyerer, P. (2005). *Recycling of thin film solar cell modules - LCA and ECO2 case study*, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.

Tina, G., Gagliano, S., & Raiti, S. (2006). Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessement. *Solar Energy, 80*(5), 578-588.

Urashima, N., Izumina, M., Arita, A., & Matsumoto, K. (2003). *Research and development on recycling technology of photovoltaic power generation systems - social system for PV recycling*, Japan.

Vestas Wind Systems A/S. (2006). Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines. *Analyse du cycle de vie (ACV)*. Retrieved 11 mars, 2009, from http://www.vestas.com/fr/vestas/durabilit%C3%A9/les-%C3%A9oliennes-et-l%27environnement/acv-(analyse-du-cycle-de-vie)

ANNEXES

ANNEXE 1 – Présentation de HOMER

La description détaillée des données à fournir est au chapitre de présentation des données et dans les annexes 5, 6 et 7 associées à ce chapitre. Dans cette section, une simple énumération des éléments à déterminer est fournie.

Demande énergétique

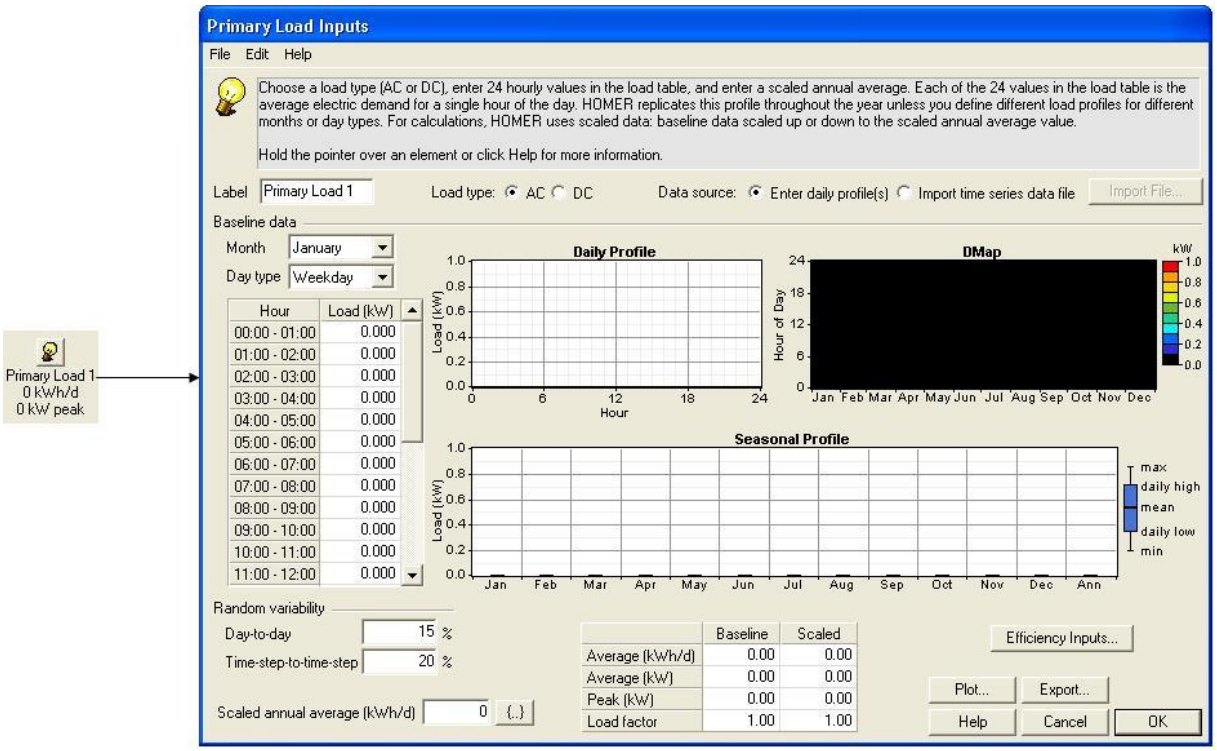


Figure 1 HOMER - Fenêtre de la demande énergétique

La demande énergétique, dont la fenêtre est illustrée à la figue 1, est simplement la consommation énergétique auquel le système doit répondre. Voici les éléments à fournir :

- Nom ou titre de la demande énergétique,
- Type de charge : AC ou DC (courant alternatif ou courant continu),
- Source des données de demande énergétique,

- Profils journaliers de consommation (entrer les données dans la section « Baseline Data »),

ou

- Importer un fichier (identifier l'emplacement du fichier à importer),

- Variabilité des données,
  - Variabilité des données jour par jour (%),
  - Variabilité des données d'heure en heure (%),
- Moyenne annuelle mise à l'échelle (kWh/jour),
- Mesures d'efficacité énergétique,
  - Coefficient multiplicateur pour l'efficacité,
  - Coût en capital ($),
  - Durée de vie (années).
- Type de graphiques possibles

Plot	
hourly	heures en heures
monthly	average value, min, max (quartile) /mois et année
dmap	help to see a pattern
profile	moy./heure pour chaque mois
pdf	fréquence des données
cdf	cumulative distribution function
dc	duration curve a graph that indicates the distribution of (…) as a function of the cumulative number of hours that the (…) exceeds a given (…) in a year

Équipements

Panneaux solaires photovoltaïques

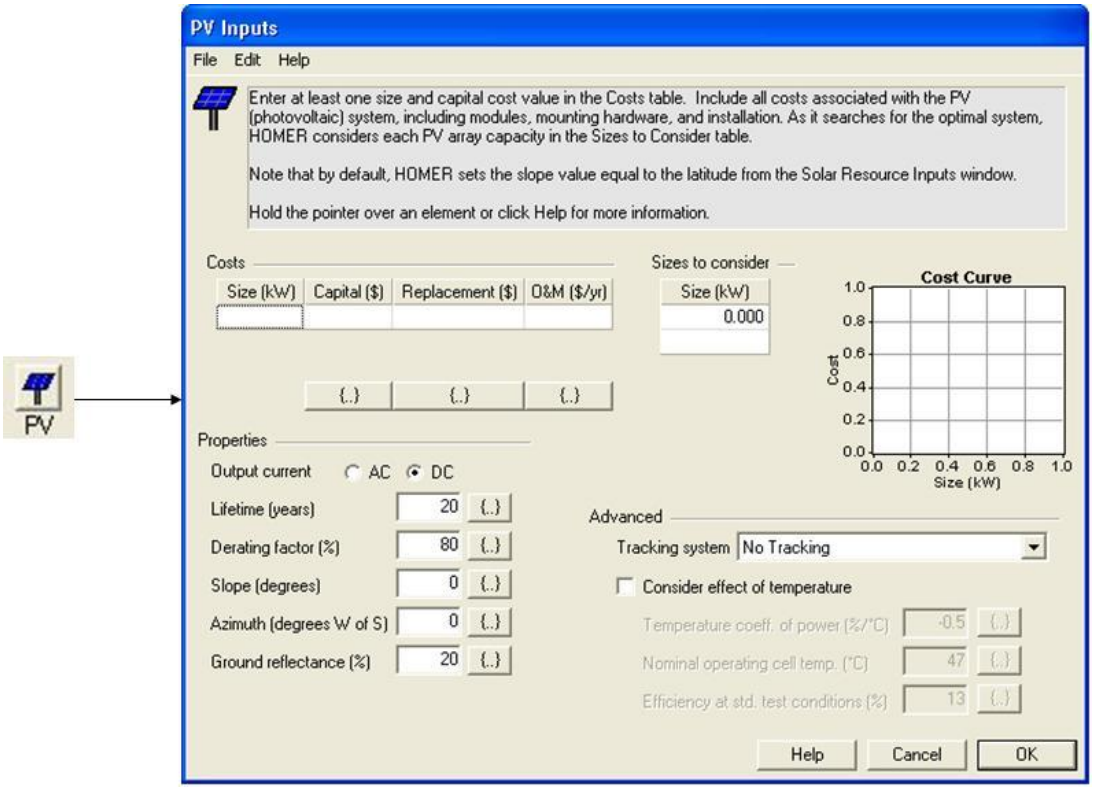


Figure 2 HOMER – Fenêtre des panneaux solaires photovoltaïques

Pour cette fenêtre, figure 2, il y a 4 sections à remplir : la section des coûts des panneaux, les grandeurs de champ de panneaux à considérer, les propriétés associées aux panneaux et des propriétés avancés que l'on peut compléter. Voici les informations à déterminer pour les coûts :

- Puissance de panneaux auquel le prix est associé (kW),
- Coût en capital de ce type de panneaux ou associé à cette puissance ($),
- Coût pour le remplacement de ce panneau ($),
- Coût d'opération et d'entretien des panneaux ($/an).

Ensuite, il faut indiquer quelles sont les puissances de panneaux solaires en kW avec lesquelles le logiciel doit faire les simulations dans la section « sizes to consider ». Dans les propriétés, on doit indiquer :

- Type de courant de sortie des panneaux, AC ou DC (généralement, courant continu),
- Durée de vie (années),
- Facteur de dévaluation (%),
- Pente des panneaux installés (degrés),
- Azimut (degrés à l'ouest du sud),
- Coefficient de réflexion du sol (%).

Finalement, la section des propriétés avancées peut être complétée. Elle comprend les informations sur le système de suivi du soleil et des informations sur l'effet de la température sur les panneaux. Pour le système de suivi de système, on peut choisir que notre système n'en a pas ou qu'il en a un et qu'il suit le soleil selon l'axe horizontal, selon l'axe vertical ou selon les deux axes. Pour considérer l'effet de la température sur l'efficacité des panneaux, il faut avoir les données suivantes :

- Coefficient de perte de puissance selon la température (%/ºC),
- Température nominale d'opération des cellules du panneau (ºC),
- Efficacité des panneaux aux conditions de tests standards.

Éoliennes

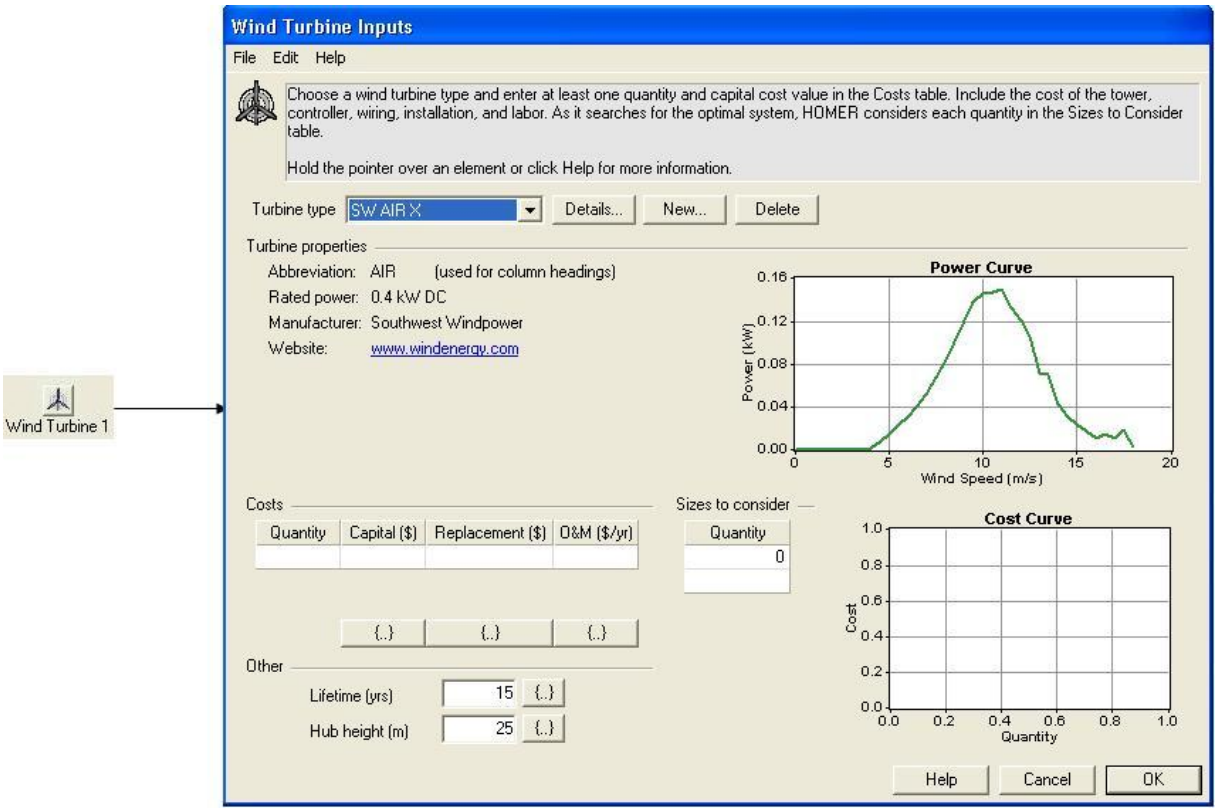


Figure 3 HOMER - Fenêtre des éoliennes

Pour les éoliennes, figure 3, on doit choisir un type d'éolienne déjà entrée dans HOMER ou choisir une éolienne générique ou encore entrer un modèle d'éolienne qui n'est pas dans la base de données de HOMER. Une fois le type d'éolienne choisi, les propriétés vont s'afficher automatiquement. Tout comme pour les panneaux solaires, il faut entrer les données des coûts :

- Quantité d'éoliennes (nombre d'éoliennes),
- Coût en capital de cette éolienne ($),
- Coût pour le remplacement de cette éolienne ($),
- Coût d'opération et d'entretien des éoliennes ($/an).

Ensuite, il faut indiquer quelles sont les quantités d'éoliennes avec lesquelles le logiciel doit faire les simulations dans la section « sizes to consider ». Finalement, il faut aussi indiquer la durée de vie en années et la hauteur du moyeu de l'éolienne en mètres.

Génératrice

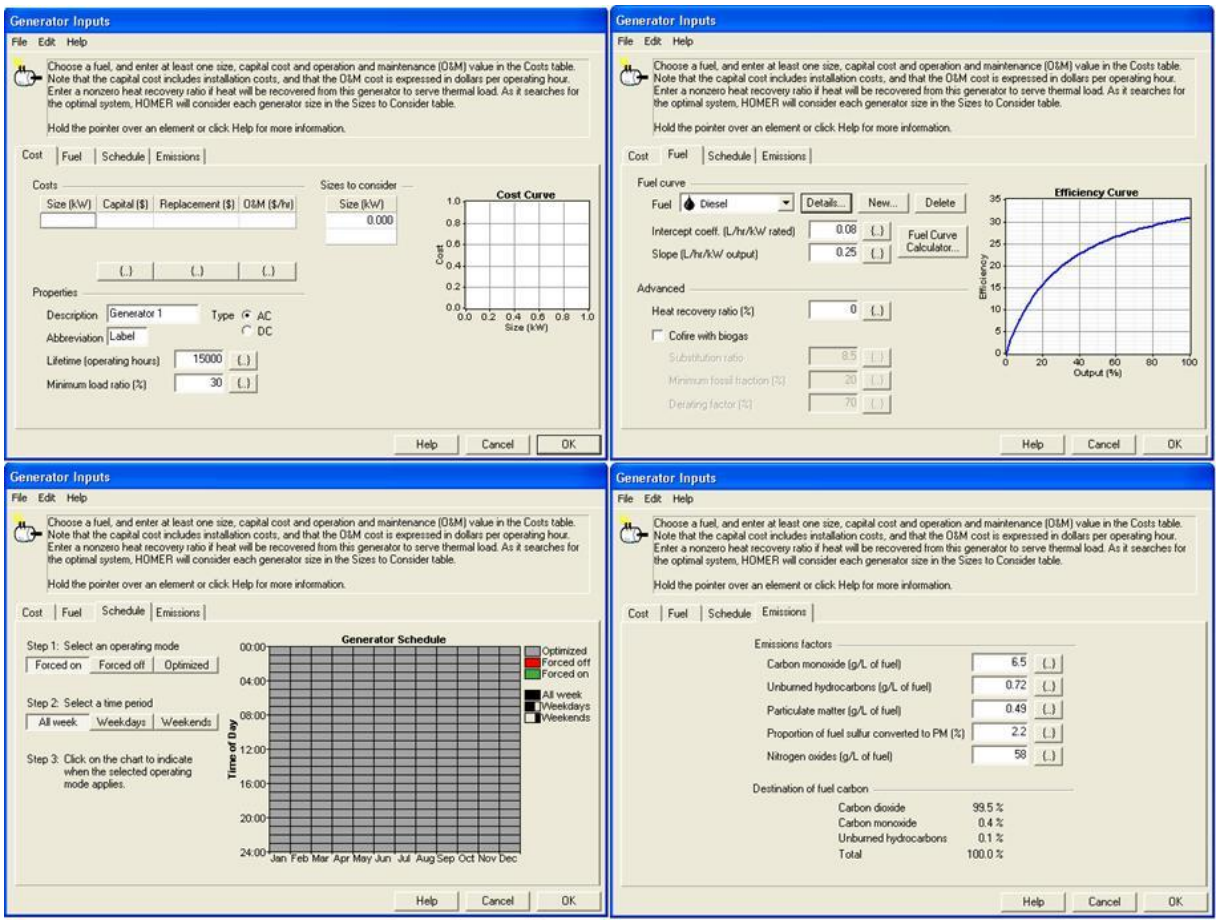


Figure 4 HOMER – Fenêtre pour la génératrice

Pour la génératrice, figure 4, il y a 4 onglets à remplir, un pour les coûts, un pour les informations concernant le combustible, un autre pour l'horaire de l'utilisation de la génératrice et un dernier pour les émissions émises. Dans l'onglet des coûts, il y a la section des coûts associés à la génératrice. Il faut entrer les données suivantes :

- Puissance des génératrices (kW),
- Coût en capital de cette génératrice ($),
- Coût pour le remplacement de cette génératrice ($),
- Coût d'opération et d'entretien des génératrices ($/an).

Ensuite, il faut indiquer quelles sont les puissances (kW) avec lesquelles le logiciel doit faire les simulations dans la section « sizes to consider ». Dans la section des propriétés de la

génératrice, les zones description et abréviation ne servent qu'à identifier ce type de génératrice. Ensuite, le type de génératrice doit être identifié soit du type courant alternatif ou courant continu. Finalement, la durée de vie en heures et la proportion minimale de charge de la génératrice doivent être déterminées.

Pour l'onglet concernant le combustible, il faut tout d'abord choisir le type de combustible parmi les choix suivants :

- Diesel,
- Biogaz,
- Ethanol,
- Essence,
- Méthanol,
- Gaz naturel,
- Hydrogène emmagasiné.

Il est aussi possible de déterminer des combustibles différents en modifiant leurs propriétés. *Intercept coefficient* et *slope* sont aussi à définir. Dans la section des propriétés avancées, il est possible d'entrer un ratio de récupération de chaleur (en %) pour une charge d'énergie thermique et si la génératrice est co-alimentée par du biogaz. Dans l'onglet de l'horaire d'utilisation, on peut forcer la génératrice à fonctionner ou à ne pas fonctionner pour des horaires déterminés. Finalement, dans l'onglet des émissions, on peut modifier les données d'émissions entrées par défaut.

Batteries

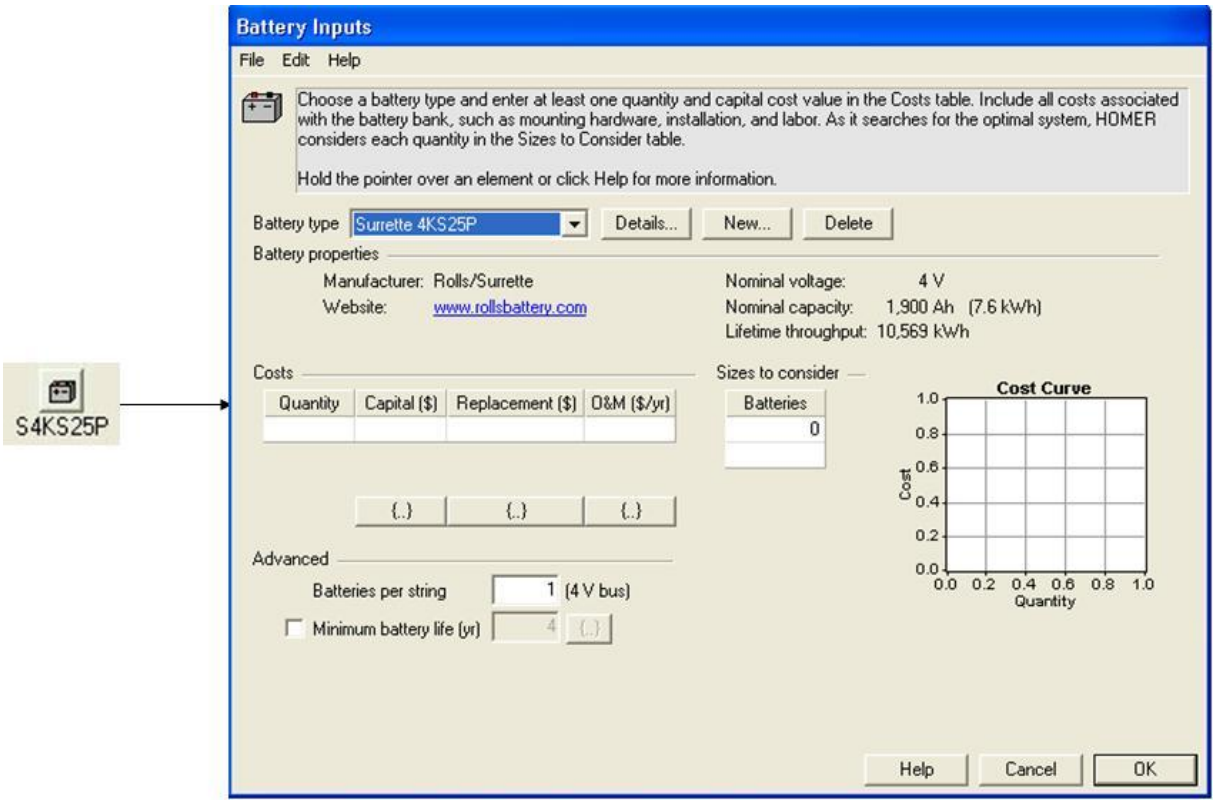


Figure 5 HOMER – Fenêtre pour les batteries

Comme pour les éoliennes, pour les batteries, figure 5, on peut choisir un type de batteries déjà entrée dans HOMER ou entrer un modèle de batteries qui n'est pas dans la base de données de HOMER. Une fois le type de batteries choisi, les propriétés vont s'afficher automatiquement. Il faut aussi entrer les données des coûts :

- Quantité de batteries (nombre de batteries),
- Coût en capital de ces batteries ($),
- Coût pour le remplacement de ces batteries ($),
- Coût d'opération et d'entretien des batteries ($/an).

Ensuite, il faut indiquer quelles sont les quantités de batteries avec lesquelles le logiciel doit faire les simulations dans la section « sizes to consider ». Finalement, dans la section de propriétés avancées, on peut déterminer le nombre de batteries en série qu'il y a dans chaque branche qui sera en parallèle et on peut aussi définir une durée de vie minimale des batteries.

Convertisseur (onduleur)

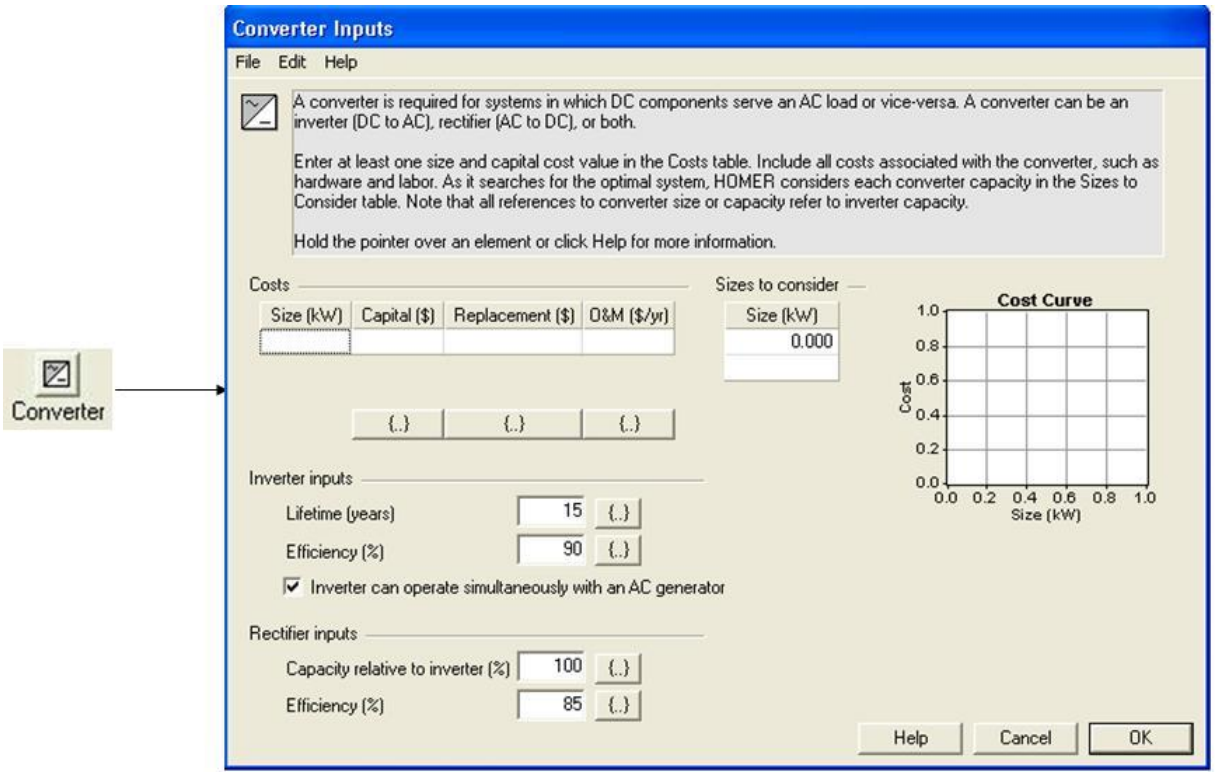


Figure 6 HOMER – Fenêtre du convertisseur

Pour les convertisseurs, figure 6, il a la section des coûts associés au convertisseur. Il faut entrer les données suivantes :

- Puissance du convertisseur (kW),
- Coût en capital du convertisseur ($),
- Coût pour le remplacement du convertisseur ($),
- Coût d'opération et d'entretien du convertisseur ($/an).

Ensuite, il faut indiquer quelles sont les puissances (kW) avec lesquelles le logiciel doit faire les simulations dans la section « sizes to consider ». On doit définir la durée de vie en années et l'efficacité (en %) dans la zone de l'onduleur. Ensuite, on identifie si le convertisseur agit simplement comme onduleur (de DC à AC) ou s'il agit aussi comme un redresseur (de AC à DC). On doit aussi déterminer l'efficacité du redresseur (en %).

Ressources

Gisement solaire

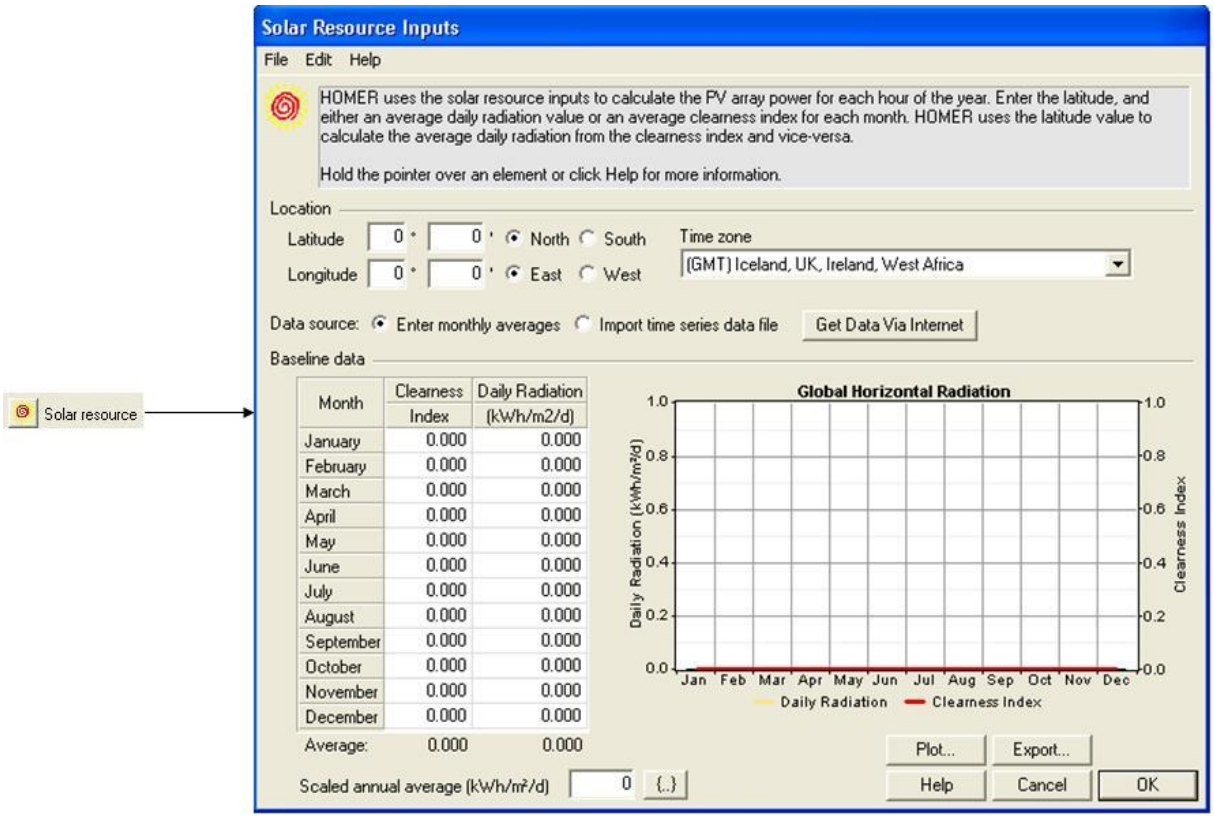


Figure 7 HOMER – Fenêtre du gisement solaire

Pour les données de gisement solaire, il ne suffit que d'entrer la longitude et la latitude du lieu désiré, lier le logiciel avec le site de données de gisement de la NASA et cliquer sur l'icône « Get Data Via Internet ». On peut aussi importer un fichier comprenant des données récoltées sur le site même. La dernière option est d'entrer des moyennes mensuelles de gisement solaire (kWh/m^2/jour). Il est aussi possible de mettre les données à l'échelle par rapport à une moyenne annuelle (kWh/m^2/jour).

Gisement éolien

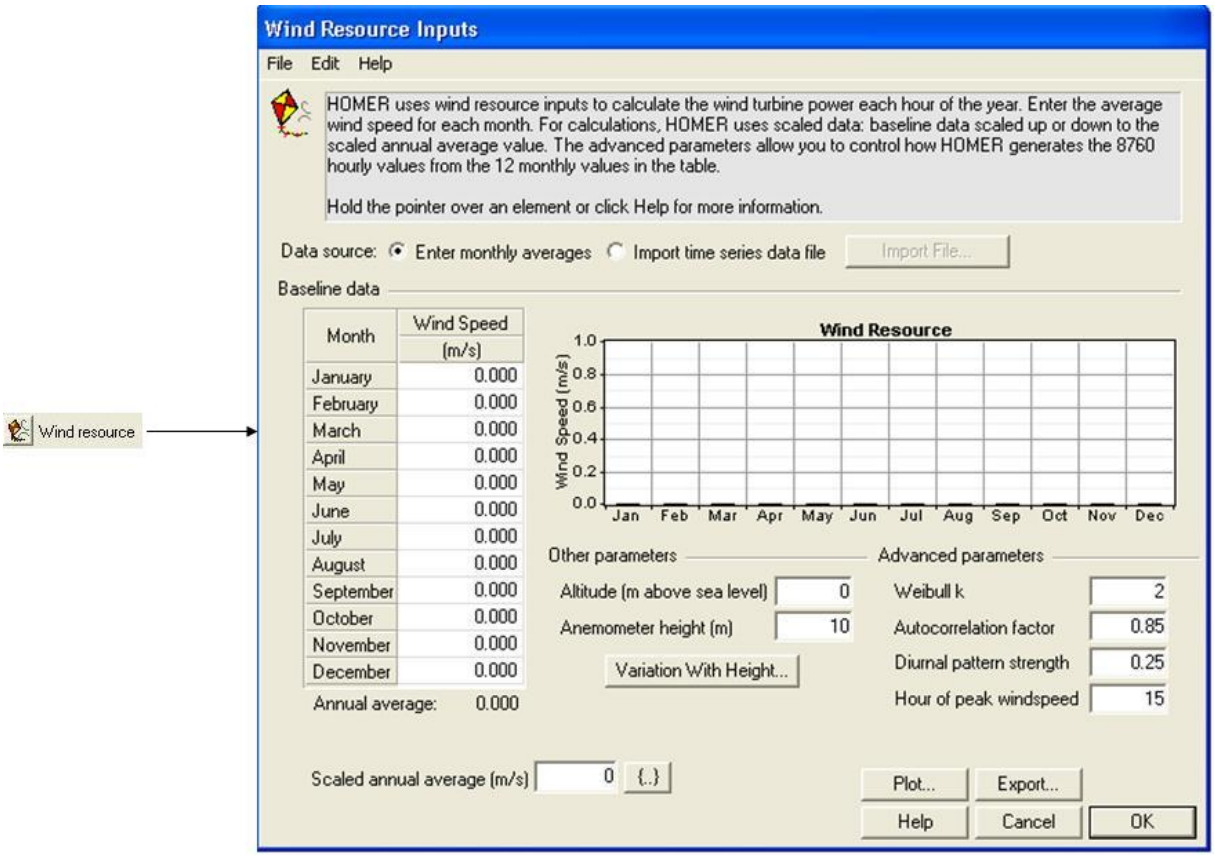


Figure 8 HOMER – Fenêtre de gisement éolien

Pour le gisement éolien, figure 8, on doit entrer des moyennes mensuelles de gisement éolien (m/s). Il est aussi possible de mettre les données à l'échelle par rapport à une moyenne annuelle (m/s). D'autres paramètres peuvent être entrés : l'altitude au-dessus du niveau de la mer (en m) et la hauteur de l'anémomètre (en m). Pour les paramètres avancés, les données suivantes peuvent être déterminées :

- Facteur Weibull,
- Facteur d'auto-correction,
- *Diurnal pattern strength*,
- Heure de vent maximum.

Combustible

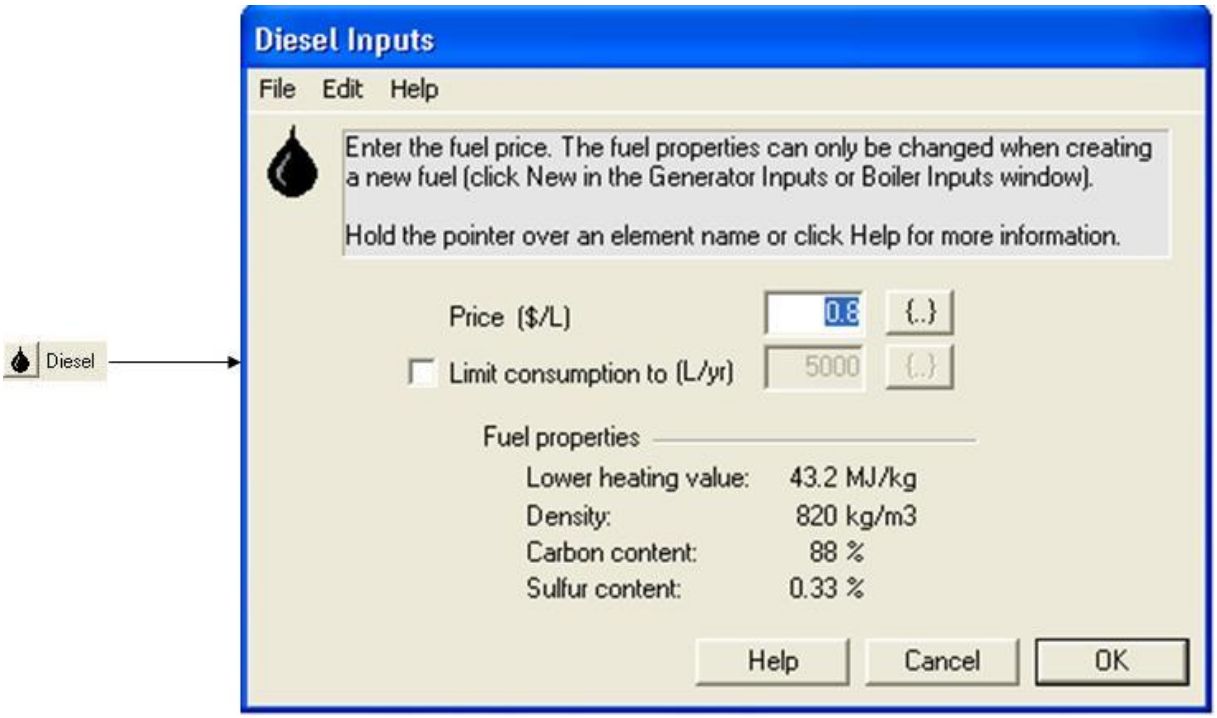


Figure 9 HOMER – Fenêtre du combustible

Pour le combustible, figure 9, les informations à fournir sont simples : le prix ($/L) et, s'il le faut, une limite de consommation du carburant.

Autres données

Données économiques

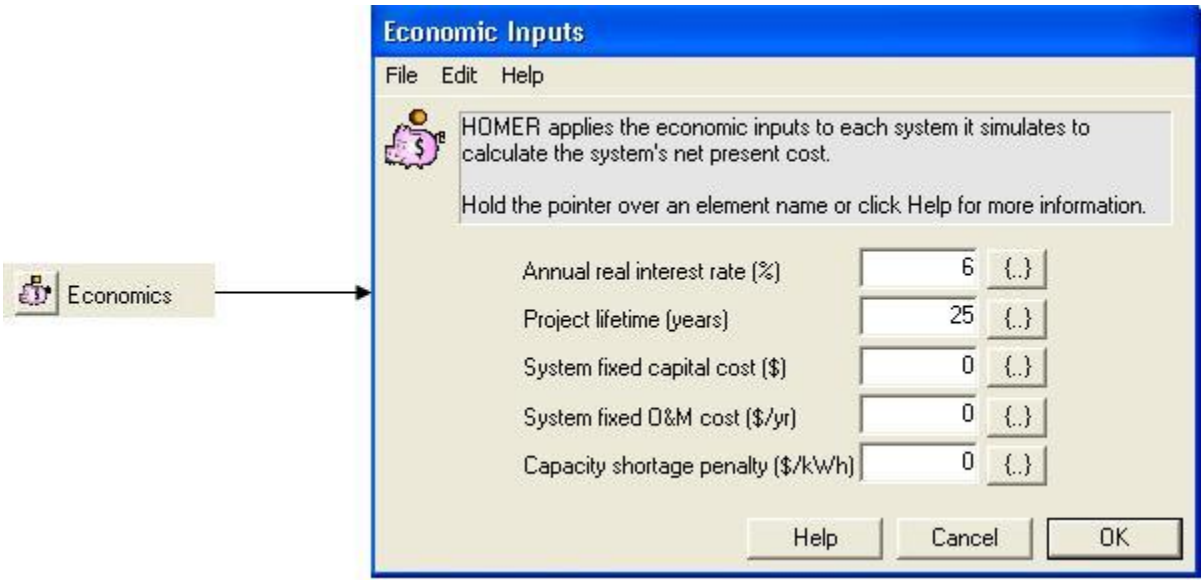


Figure 10 HOMER – Fenêtre des données économiques

Dans HOMER, les données économiques, figure 10, pouvant être entrées sont :

- Taux d'intérêt annuel (%),
- Durée de vie du projet (années),
- Coûts fixes en capital ($),
- Coûts fixes en opération et en entretien ($/an),
- Pénalité pour manque d'énergie ($/kWh).

Contrôle du système

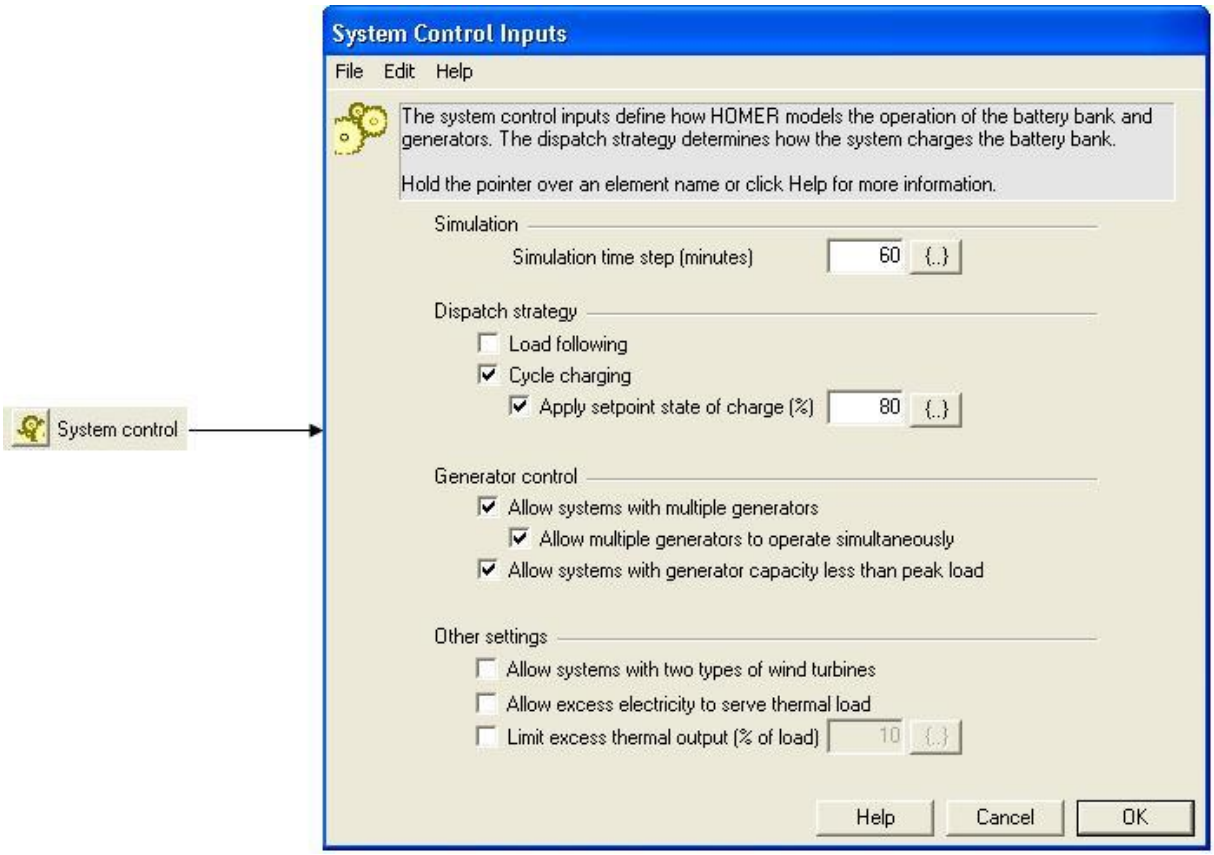


Figure 11 HOMER – Fenêtre de contrôle du système

La fenêtre de contrôle du système, figure 11, permet de choisir certaines données pour la simulation du système dans HOMER. On peut décider des intervalles de temps pour la simulation, de la stratégie de répartition d'énergie et du contrôle des génératrices. D'autres paramètres sont aussi disponibles : permettre des systèmes utilisant 2 types d'éoliennes, permettre un surplus d'énergie pour une charge d'énergie thermique et limiter le surplus d'énergie.

Émissions

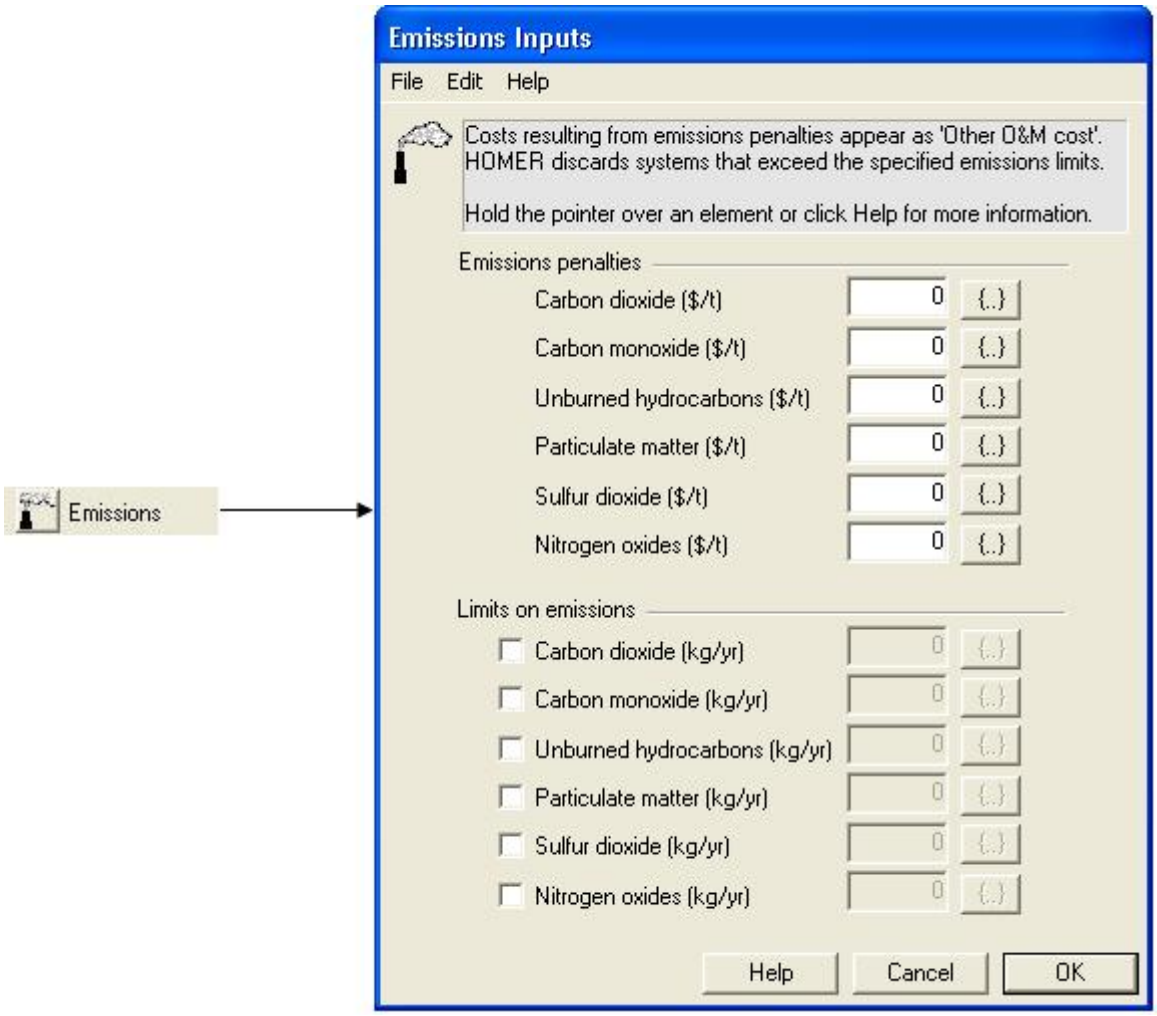


Figure 12 HOMER – Fenêtre pour les émissions

Dans HOMER, on peut tenir compte des pénalités financières imposées pour les émissions dans l'air en $/tonne et on peut aussi indiquer une limite pour ces mêmes émissions en kg/an, voir figure 12. Voici les substances concernées :

- Dioxyde de carbone et monoxyde de carbone,
- Hydrocarbures non brûlés,
- Particules,
- Dioxyde de souffre,
- Oxydes d'azote.

Contraintes

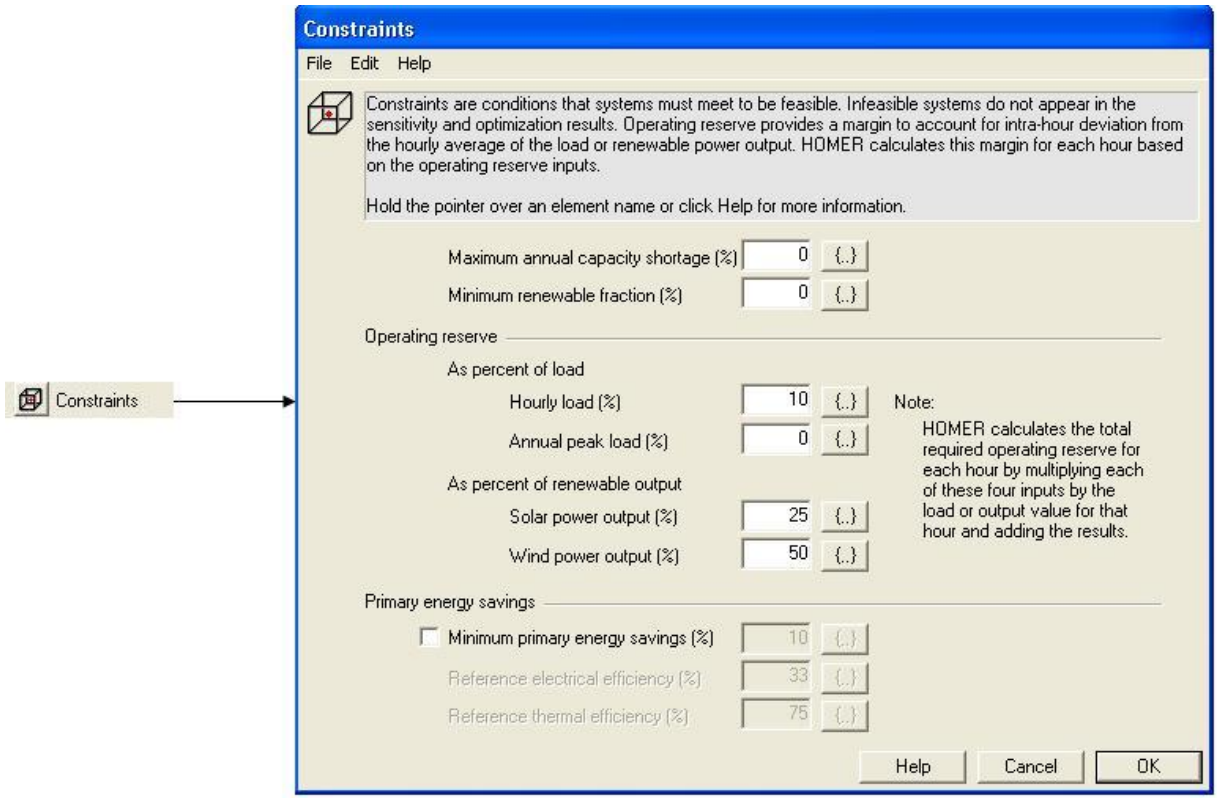


Figure 13 HOMER – Fenêtre des contraintes

Les contraintes sont des conditions que le système doit rencontrer. On peut indiquer si on permet un déficit en énergie et imposer une proportion minimale d'énergie renouvelable requise dans le système. Dans cette section, on détermine aussi les réserves d'énergie en pourcentage soit en fonction de la charge, soit en fonction du type d'énergie. Les réserves permettent d'avoir un surplus d'énergie pour assurer l'alimentation continue.

ANNEXE 2 – Méthodologie pour le photovoltaïque avec Homer

Pour effectuer le dimensionnement avec le logiciel HOMER, on peut simplement entrer une série de données et le logiciel donne la solution optimale parmi les données soumises. Ce n'est cependant pas nécessairement la solution optimale absolue, mais plutôt la solution optimale parmi les choix soumis. Avec une méthode itérative, on pourrait arriver à la solution optimale pour un lieu donné, mais le processus peut s'avérer long si on n'a pas d'ordre de grandeur de la taille du système. De plus, on n'a aucune base de comparaison pour évaluer la justesse des résultats si on ne fait aucun calcul préalable.

Je préconise donc un dimensionnement préalable à la main, principalement basé sur la méthode décrite dans (Labouret & Villoz, 2005), de tout le système photovoltaïque ; c'est-à-dire le dimensionnement des panneaux solaires et de tout l'équipement associé (batteries, convertisseur, onduleur, etc.). J'ai donc établi une méthodologie afin d'arriver à des résultats concluants en utilisant des calculs manuels et le logiciel HOMER.

Démarche globale pour le photovoltaïque

La démarche globale est logique et élémentaire :

1. Évaluer de la demande énergétique (consommation d'énergie);
2. Pré-dimensionner à la main des panneaux et des équipements;
3. Identifier les équipements nécessaires pour le système (panneaux solaires, convertisseur, batteries…) dans le logiciel HOMER;
4. Entrer les données nécessaires dans le logiciel :
    a. de consommation énergétique;
    b. de gisement solaire pour le lieu désiré;
    c. des équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien);
5. Lancer le calcul dans HOMER;
6. Optimiser les résultats de HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système;

7. Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire;
8. Valider le système.

L'utilisation du logiciel HOMER est simple et intuitive, mais un travail de recherche en amont doit être fait minutieusement et rigoureusement pour les données entrées, surtout au niveau des coûts des équipements. Si ce travail n'est pas effectué correctement et sérieusement, les résultats obtenus ne représenteront pas un système fonctionnel réel ou du moins plausible.

Étape 1 : Évaluer de la demande énergétique

Les données de consommation doivent préférablement être évaluées. Le tableau 1, un tableau classique pour déterminer la consommation journalière d'une famille ou d'une maison, permet de lister les appareils utilisés (RNCREQ, 2009). Par la suite, on indique la tension, la puissance et le temps d'utilisation par jour des appareils. Une fois ce travail complété, il est possible de faire le total de la consommation de chaque appareil en Wh/j (puissance * temps d'utilisation). Pour le cas des tensions C.A., il faut tenir compte des pertes dues à l'onduleur.

Tableau1 : Évaluation de la demande énergétique journalière

Nom de l'appareil électrique	Tension C.A. ou C.C.	Puissance Watt	Rendement onduleur pour C.A.	Puissance Watt, avec pertes	Utilisation heures /jour	Total en Wh/j

Lorsque le tableau est complété, on peut sommer la dernière colonne pour obtenir la demande énergétique globale pour une journée en Wh/j. Si des données sont disponibles d'heure en heure ou par jour, il est possible de les utiliser directement dans le logiciel HOMER.

Étape 2 : Pré-dimensionner

Le pré-dimensionnement peut être fait pour tous les équipements principaux selon la démarche explicitée dans le livre Énergie solaire photovoltaïque. Pour un système photovoltaïque hors réseau, il est nécessaire de préalablement dimensionner au minimum le champ de panneaux photovoltaïques, et je recommande aussi de dimensionner les accumulateurs (système de batteries). Pour de meilleurs résultats, une meilleure analyse et une meilleure compréhension du système, il est mieux de dimensionner tous les équipements importants, régulateur et onduleur inclus. On peut même dimensionner le câblage et les équipements connexes (fusibles, para-foudre, etc.) pour une analyse plus détaillée. Des schémas du champ de panneaux, des accumulateurs et du câblage peuvent aussi être effectués. Le logiciel HOMER, bien que très bien fait et très utile, n'est qu'un outil. Ainsi, s'il est lancé avec des données farfelues ou erronées, les résultats qu'il produira ne représenteront pas la réalité. Parfois, à cause du format des données entrées, on doit forcer certaines données pour obtenir un système qui représente la réalité.

Il est important de garder en mémoire que les logiciels ne sont que des outils et on se doit de comprendre leur fonctionnement correctement afin d'obtenir des résultats concluants.

2.a. Dimensionnement du champ de panneaux

Pour le dimensionnement du champ de panneaux, deux équations sont nécessaires :

Équation 1 : Relation entre le gisement solaire et le nombre d'heures équivalent

$$E_{sol} = N_e \bullet 1000$$

N_e : nombre d'heures équivalent en h/j

E_{sol} : gisement solaire en $Wh/(m^2j)$

1000 : ensoleillement optimum de 1000 W/m^2

Équation 2 : Relation entre la demande énergétique et la puissance crête

$$E_{elec} = N \bullet P_c$$

E_{elec} : demande énergétique journalière en Wh/j

N : nombre d'heure en h/j

P_c : puissance crête en W_c

La première permet de calculer le nombre d'heures équivalent d'ensoleillement, N_e, pour une journée à partir des données de gisement solaire, E_{sol} en Wh/(m^2j) -- énergie reçue par 1 m^2 en un jour.

En fait, la puissance des panneaux solaires est déterminée sous des conditions standardisées (ensoleillement optimum de 1000W/m^2, à une température de 25°C et sous un ciel clair), donc la première équation permet de déterminer le nombre d'heures équivalent N_e de cet ensoleillement optimal de 1000W/m^2 en utilisant le gisement solaire.

Ayant obtenu le N_e, on peut ensuite prendre la deuxième formule. Celle-ci met en relation la puissance nécessaire à notre système, P_c, à partir de la demande énergétique, E_{elec} en Wh/j. La puissance crête est la puissance des panneaux nécessaires, notée P_c en Watt. La puissance crête est souvent indiquée en W_c pour éviter les confusions d'unités.

En résumé, on trouve d'abord N_e, le nombre d'heures équivalent à partir du gisement solaire, ensuite on calcule P_c, la puissance des panneaux (puissance crête) avec la demande énergétique et le nombre d'heures équivalent.

La demande énergétique utilisée est celle évaluée à l'aide du tableau 1 ou à l'aide de données disponibles. Dans le cas de données déjà disponibles, l'utilisation du pire cas (plus grande consommation) est appropriée pour le pré-dimensionnement. Ensuite on peut ajouter des pertes (pertes dans le système photovoltaïque et pertes de l'onduleur si ce n'est pas déjà pris en compte).

Équation 3 : Puissance crête avec pertes

$$Pc_{finale} = P_c / (C_p * C_{ond})$$

Pc_{finale} : puissance crête finale en tenant compte des pertes en W_c

P_c : puissance crête avant pertes en W_c

C_{ond} : efficacité de l'onduleur en décimale

C_p : coefficient associé aux pertes de courant de sources variées

Sources de pertes :

- Salissure du panneau – neige, sable, vitrage (courant), 5-15%
- Aux bornes de diodes série (tension)
- Aux bornes du régulateur série (tension)
- Aux bornes des câbles (tension), pertes considérées nulles si câblage optimisé
- Température élevée, pays chaud seulement et selon le type de technologie (tension)
- Régulateur classique (si régulateur MPPT, pas de pertes)
- Efficacité de la batterie
- Perte de début et fin de journée (tension)
- *Différence entre puissance réelle du panneau et puissance annoncée (parfois nécessaire)*

Si le système est bien dimensionné en tension (modules avec une tension suffisante pour pallier aux pertes en tension), les pertes se résument aux salissures et à l'efficacité de la batterie. Le C_p varie généralement entre 0,65 et 0,9.

Une fois la puissance du champ de panneaux déterminée, on peut trouver, en première approximation, le nombre de panneaux nécessaires, on n'a qu'à diviser la puissance crête par la puissance du modèle de panneaux utilisés. Le nombre de panneaux nécessaires est intéressant à connaître pour évaluer la surface qui serait utilisée par les panneaux. Ceci peut être un indice de la viabilité du projet. À la suite du dimensionnement, on peut obtenir 2 valeurs de puissance crête, celle avec le gisement du pire mois, l'autre avec le gisement moyen de tous les mois.

Lorsqu'on dimensionne simplement, on prend le gisement du pire mois. Pour l'optimisation du système, les 2 valeurs sont intéressantes afin d'obtenir un intervalle de possibilités.

De plus, une fois la puissance crête calculée, on peut déterminer la tension du système. Cette tension est recommandée en fonction de la taille du système selon le tableau 2.

Tableau 2 : Tension recommandée pour un système photovoltaïque

Puissance du champ	0-500Wc	500 Wc- 2kWc	2-10kWc	plus de 10kWc
Tension suggérée	12VDC	24VDC	48 VDC	plus de 48VDC

La tension issue de ce tableau est la tension nominale du système. Afin de combler les pertes en tension, la tension doit être supérieure. Par exemple, la tension maximale, V_m, sera de 17-18V pour les pays chauds et de 15-16V pour les pays tempérés pour une tension nominale de 12V.

Les besoins journaliers peuvent aussi être définis en Ah/j. On doit donc diviser les besoins énergétiques en Wh par la tension nominale du système (tension identifiée précédemment à l'aide de la puissance crête du système avec le tableau 2).

Équation 4 : Besoins journaliers en Ah/j

$$\mathbf{B_j=E_{elec}/V_{nom}}$$

B_j : besoin journalier en Ah/j

E_{elec} : demande énergétique en Wh/j

V_{nom} : tension nominale du système en V

Équation 5 : Courant maximal nécessaire

$$\mathbf{I_m=B_j/(E_{sol}*C_p)}$$

I_m : Courant associé à la puissance maximale en A

B_j : besoin journalier en Ah/j

E_{sol} : gisement solaire en $Wh/(m^2j)$

C_p : coefficient associé aux pertes de courant de sources variées

La puissance crête minimale nécessaire du système tiendra compte de la tension maximale et du courant maximal.

Équation 6 : Puissance minimale requise pour le système

$$\mathbf{P_c=V_m*I_m}$$

P_c : puissance crête minimale du système en W_c

V_m : tension *maximale* en V

I_m : courant maximal en A

La puissance crête nécessaire peut être mise à jour et le nombre de panneaux nécessaires révisé.

Il est possible qu'un système soit très gros et exige de le diviser en sous-systèmes afin de réduire les pertes par dissipation de chaleur à cause du courant trop élevé. La tension globale du système peut être augmentée (240, 480, 720, 960 Volt). Je suggère de diviser les sous-systèmes de façon à ce que le courant nominal total soit de moins de 100 A.

2.b. Batteries

Le pré-dimensionnement des accumulateurs est aussi déterminant. HOMER permet de définir plusieurs séries de batteries en parallèle. Les batteries sont généralement définies en Ah, on utilise donc les besoins journaliers, B_j, en Ah/j.

Pour déterminer le système de batteries, il faut donc connaître le nombre de jours d'autonomie nécessaire, c'est-à-dire le nombre de jours susceptibles d'être sans apport d'énergie solaire et les températures pour le lieu choisi. Des températures basses sont nocives pour les batteries. Il faut donc appliquer un coefficient réducteur qui tient compte de ce fait. On doit aussi connaître la

profondeur de décharge du type de batteries choisi (seuil sous lequel la batterie ne peut être déchargée, sinon elle sera endommagée). Avec ces données et la demande énergétique, on calcule la capacité des batteries et la capacité en tenant compte des coefficients de réduction comme décrit dans (Labouret & Villoz, 2005).

Équation 7 : Calcul de la capacité des batteries

$$\mathbf{C_{Ah}=N_{ja}*B_j}$$

C_{Ah} : capacité en Ah

N_{ja} : nombre de jours d'autonomie nécessaires en jours

B_j : besoin journalier en Ah

Pour trouver le nombre de jours nécessaires pour le dimensionnement des batteries, le site de la NASA SSE offre des données de jours équivalents sans soleil. Ces données peuvent être utilisées pour identifier le nombre de jours d'autonomie nécessaire.

Équation 8 : Calcul avec coefficients réducteurs

$$\mathbf{C_{nom}= C_{Ah}/(P_d*R_t) = (N_{ja}*B_j)/(P_d*R_t)}$$

C_{nom} : capacité nominale en Ah

P_d : profondeur de décharge maximale autorisée (généralement 0.7 ou 0.8)

R_t : coefficient réducteur tant compte de la température

(dépend de la batterie choisie)

Il faut donc obtenir la tension désirée en mettant plusieurs batteries en série et pour obtenir le système final voulu, il faut mettre plusieurs séries de batteries en parallèle.

Infos supplémentaires : http://www.majorpower.com/inverters/battery_sizing_faq.pdf

2.c. Autres équipements

Le régulateur, le convertisseur et le câblage peuvent aussi être dimensionnés pour une meilleure approximation des coûts. Le dimensionnement des autres équipements accessoires (protections contre la foudre, fusibles, disjoncteurs et autres) est superflu pour une étude macroscopique.

Seul le convertisseur est représenté dans HOMER. Le régulateur et le câblage peuvent être dimensionnés selon (Labouret & Villoz, 2005) et leurs coûts associés ainsi estimés. Le régulateur doit être inclus dans les coûts de panneaux solaires ainsi que le câblage et autres fournitures nécessaires dans le cas de simulations dans HOMER.

Convertisseur

Équation 9 : Dimensionnement du convertisseur/onduleur selon puissance du système

$$\textbf{Puissance}_{\textbf{onduleur}} \textbf{ = coeff* puissance de sortie des panneaux}$$

Pour système hors réseau :

Coeff : 1.25 à 1.3 (25 à 30% de plus que la puissance des panneaux)

http://www.leonics.com/support/article2_12j/articles2_12j_en.php

Pour système connecté au réseau :

Coeff : 1.1*puissance de l'installation

http://www.infinitepower.org/pdf/FactSheet-24.pdf

Ou

Équation 10 : Dimensionnement du convertisseur/onduleur selon puissance instantanée maximale

$$\textbf{Puissance}_{\textbf{onduleur}} \textbf{ = coeff* puissance instantanée maximale}$$

Coeff : 1.25* puissance instantanée maximale

http://www.infinitepower.org/pdf/FactSheet-24.pdf

Si la puissance instantanée maximale est connue, les 2 calculs sont faits et la valeur maximale est utilisée.

Régulateur

Le régulateur est dimensionné selon 3 paramètres : tension nominale, courant d'entrée et courant de sortie. La tension doit être équivalente à celle des panneaux (tension nominale : 12 V, 24 V ou 48 V). Le courant d'entrée correspond au courant instantané maximal que les panneaux peuvent débiter. Le courant de sortie doit correspondre au courant instantané maximal de la demande.

Équation 11 : Dimensionnement du régulateur (courant)

Courant = 1,5* Courant nominal

pour un régulateur shunt : 1.5* courant de court-circuit total du champ

pour un régulateur série : 1.5* courant Im total au point de puissance maximale

Équation 12 : Dimensionnement du régulateur (tension)

Tension maximale = 2* tension nominale

Câblage

Un schéma de câblage peut être effectué, mais n'est pas nécessaire pour l'étude macroscopique. La démarche est décrite dans (Labouret & Villoz, 2005).

Étape 3 : Identifier les équipements nécessaires

Cette étape est très rapide. Elle consiste à identifier les équipements nécessaires pour le système qu'on veut modéliser. Dans le cas du système photovoltaïque hors réseau, on a besoin de panneaux solaires, de batteries, d'un convertisseur/onduleur, il ne s'agit que de choisir les équipements dans HOMER afin de pouvoir, par la suite, entrer les données qui leur sont associées. Dans la zone « équipement » (*equipment to consider*), il faut aussi inclure la « demande énergétique » *(primary load*). Sans demande énergétique, HOMER donne un message d'erreur, le logiciel étant fait pour optimiser le système de production d'énergie en fonction de la demande énergétique.

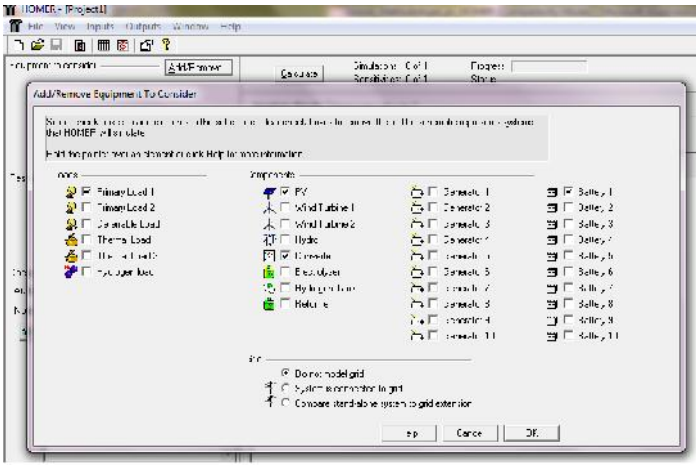


Figure 7.1 : Équipements sélectionnés dans HOMER

Étape 4 : Données à entrer

La qualité et l'exactitude des données entrées sont très importantes parce que le logiciel HOMER se base sur ces données pour effectuer les calculs. Celles-ci ont donc un impact direct sur la justesse des résultats obtenus.

Il est **impératif** de consulter l'aide de HOMER lorsqu'on entre les données.

L'aide décrit ce qu'il faut inclure et définit précisément les termes utilisés dans le logiciel. Parfois, l'aide de HOMER suggère des sites internet à consulter ou même des valeurs à entrer. L'aide est un outil essentiel pour tout projet.

4a. Données de consommation énergétique

Pour les données de consommation énergétique, un profil peut être entré pour chaque heure de la journée et ce pour tous les jours de l'année. Dans le cas où la demande a été évaluée avec le tableau 1, il est bien de déterminer les moments de la journée quand les appareils sont susceptibles d'être utilisés et de faire un profil de consommation journalier le plus précis possible. Les pointes de consommation pour une résidence sont souvent le matin avant que les gens partent travailler et les soirs, du retour du travail jusqu'au coucher. Cependant, le profil journalier dépend totalement des activités effectuées (résidence, chalet, industrie, observatoire, camp de chasse, etc.) et du mode d'utilisation des équipements.

Il est donc important d'ajuster le profil de consommation à la situation donnée.

4b. Données de gisement solaire

Il est possible d'entrer à la main les données de gisement solaire pour chaque mois, mais d'autres possibilités sont offertes: entrer des données pour chaque heure du jour et chaque jour de l'année, ou lier le logiciel avec les données de la NASA, ce qui permet d'obtenir les données de gisement

du lieu indiqué pour chaque mois simplement en entrant les coordonnées géographiques (latitude et longitude). Il est certain que si les données sont disponibles pour toutes les heures de l'année et que le profil de consommation est aussi disponible dans ce format, les résultats seront optimaux. Dans les autres cas, lier le logiciel aux données disponibles à la NASA pour le gisement solaire est approprié.

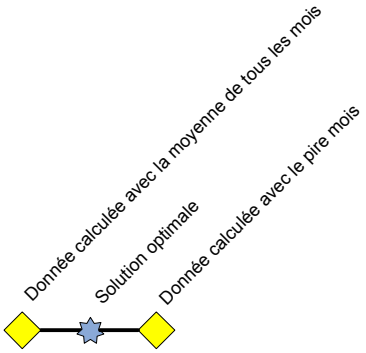
4c. Données d'équipement

Les données pour l'équipement concernent l'équipement qui sera utilisé pour le système de production d'électricité.

Grandeurs à considérer

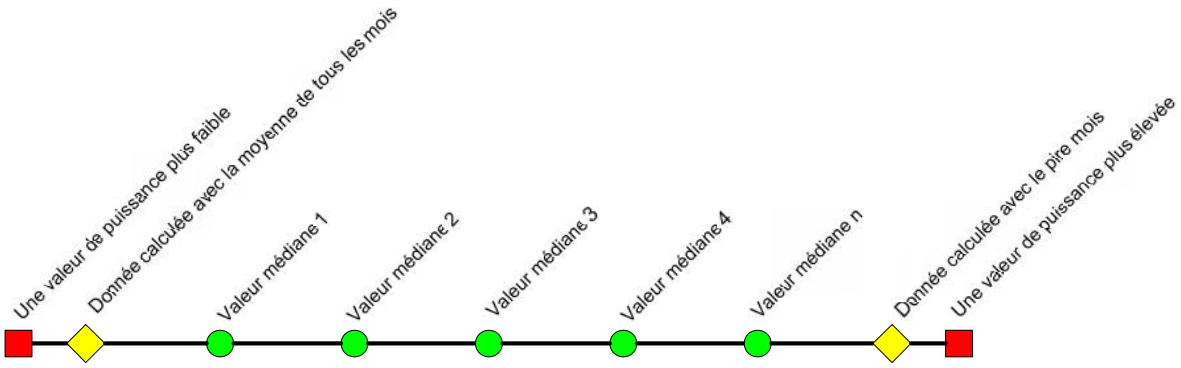
- Champ de panneaux solaires

À la suite de plusieurs essais et calculs sur HOMER, les données de gisement à utiliser pour le dimensionnement sont la moyenne de tous les mois de l'année et la donnée du pire mois de l'année. La solution optimale calculée par HOMER pour la puissance crête se situe, en général, entre les valeurs de puissances crêtes calculées avec ces données.



Je suggère donc d'utiliser les valeurs suivantes comme entrées dans HOMER pour un premier calcul:

- Une valeur plus faible que la plus petite valeur calculée
- **Donnée de puissance crête calculée avec la moyenne de tous les mois**
- Quelques valeurs médianes
- **Donnée de puissance crête calculée avec le pire mois**
- Une valeur plus élevée que la plus grande valeur calculée



Les valeurs, plus faible et plus élevée, permettent de s'assurer qu'il n'y a pas de solution qui nécessite moins de panneaux ou plus de panneaux que les solutions auxquelles on s'attend.

- Batteries

Il faut entrer les valeurs obtenues par le pré-dimensionnement. Si on a seulement une série de batteries, on doit entrer directement le nombre de batteries désirées. Pour définir plusieurs séries de batteries, on doit entrer le nombre de batteries en série et le nombre de séries de batteries qui seront en parallèle.

- Convertisseur

Il faut entrer la valeur du pré-dimensionnement. On peut mettre d'autres valeurs dans HOMER, mais il faut faire une bonne analyse des résultats optimisés que donnent HOMER dans ce cas à cause du format des données entrées. Les données de demande énergétique sont entrées en kW pour chaque heure de la journée : on entre donc une puissance moyenne sur une heure. HOMER ne connaît donc pas la valeur maximale de puissance instantanée requise par le système.

Coûts des équipements

Les coûts peuvent être trouvés sur de nombreux sites internet en fonction de la région où le projet a lieu. Les sites internet sont de bonnes ressources tant qu'on s'attarde à la fiabilité et à validité de la source (sites d'organismes reconnus ou sites gouvernementaux). Ils sont souvent plus à jour que les livres et plus accessibles que les articles scientifiques. Il est important de porter une attention particulière au lieu géographique et aux prix trouvés : dans certains pays les équipements sont plus chers. Le prix peut être défini selon une moyenne de prix trouvés sur plusieurs sites pour des équipements bien précis ou il peut être déterminé selon des prix généraux. Par exemple, on peut trouver le prix moyen des panneaux par W_c au lieu d'un prix pour un modèle de panneaux précis. Lorsqu'on entre les données, il faut faire attention : le prix doit parfois être entré par équipement (par batterie), et parfois selon la puissance de l'équipement (panneaux solaires, prix pour une certaine puissance).

- Panneaux solaires

Il est important de noter que le prix à entrer doit tenir compte du prix des panneaux solaires, des fixations des panneaux, du système de suivi du soleil s'il y en a un, des régulateurs, du câblage et de l'installation. Pour les coûts des panneaux, on peut entrer plusieurs puissances de panneaux et le prix associé. Cette possibilité est intéressante parce que les panneaux de petites puissances ont souvent un prix par W_c plus élevé que les panneaux de grandes puissances, donc si on a le loisir de choisir le type de panneaux qu'on veut, le prix global sera mieux adapté à la situation. Pour de grandes demandes énergétiques, on prend les panneaux de plus grandes puissances afin d'avoir le plus faible coût et le moins de panneaux possible. Voici quelques références en termes de pourcentage pour les coûts des autres équipements inclus dans le coût des panneaux pour le logiciel HOMER.

Modules : 50-60% des coûts totaux du système

http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm

Régulateur : coût moins de 5% du coût total du système

Installation : 10 % des coûts totaux du système

http://www.retscreen.net/fr/speakers_notes_photovoltaic_project_analysis.php

- Batteries

Les batteries généralement utilisées en pv sont les batteries au plomb. Voici quelques indications des frais associés aux batteries pour des systèmes photovoltaïques.

13-15% des coûts initiaux

Jusqu'à 50% des coûts totaux

- Convertisseur/onduleur

Onduleur : 10-15% des coûts totaux du système

http://www.retscreen.net/fr/speakers_notes_photovoltaic_project_analysis.php

http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm

(Luque & Hegedus, 2003)

Étape 5 : Lancer le calcul

Une fois toutes les données entrées, il faut lancer le calcul sur HOMER. Le temps de calcul est rapide. Les résultats sont ensuite affichés, avec la solution la moins chère en premier. On peut voir tous les résultats de tous les systèmes « *overall* » ou les résultats par type de système « *categorized* ». HOMER produit parfois aussi des avertissements. En général, il ne faut plus avoir d'avertissements, sauf dans certains cas pour lesquels on impose des valeurs. Il faut donc bien comprendre la nature des avertissements et des erreurs donnés par HOMER et agir avec discernement.

Étape 6 : Optimiser les résultats

La phase d'optimisation des résultats est le cœur même de la démarche. L'optimisation se fait de façon itérative, on tient à tendre vers la solution optimale. HOMER donne la solution optimale

parmi les grandeurs de système proposées. Le principe est donc simple; on utilise la solution optimale donnée par HOMER, on remet cette valeur dans HOMER ainsi que la valeur au-dessus et au-dessous et des valeurs intermédiaires. On refait le même processus jusqu'à ce qu'on obtienne une solution optimale. On peut se guider avec une donnée intéressante des résultats autre que le coût : l'excès d'énergie du système. Il est certain que l'excès d'énergie est de plus en plus grand pour des latitudes élevées pour des systèmes photovoltaïques hors réseau. Pour des lieux près de l'équateur, il est possible d'avoir un système ayant moins de 5 % d'excès d'énergie et même près de 0 %, ce qui est excellent. Après avoir obtenu le système optimisé, on peut mettre un facteur de sécurité sur la solution trouvée.

Étape 7 : Faire des analyses de sensibilité (facultatif)

Des paramètres jugés influents, ayant une grande incertitude, ou ayant une plus grande variabilité doivent être cernés. Les analyses de sensibilité servent à savoir si, même avec une variation de ces paramètres, les résultats restent les mêmes et sinon, quelles influences ils apportent. Ces paramètres peuvent être : le coût des équipements, le coût de rachat de l'électricité par le réseau, les données de gisement solaire, la demande énergétique. La plupart des données entrées peuvent être utilisées pour des analyses de sensibilité. Celles-ci multiplient le nombre de calculs à effectuer par le logiciel et, par conséquent, le temps de calcul. C'est pourquoi il est préférable de cerner les paramètres les plus sensibles pour notre étude. De plus, ces analyses doivent être exécutées sur les systèmes optimisés pour lesquels les données des systèmes obsolètes ont été enlevées.

Étape 8 : Valider le calcul HOMER

COE – cost of energy

Parmi les résultats, le coût de revient de l'énergie en $/kWh peut être un bon indice pour valider le système. Pour des systèmes photovoltaïques autonomes, ce coût est d'environ quelques dollars (1 à 3$/kWh environ*)* alors que pour les systèmes raccordés au réseau le prix de revient peut être aussi faible que 30¢/kWh (varie entre 30¢/kWh et 60¢/kWh). Si l'ordre de grandeur n'est pas bon (ex : plus de 10$/kWh), les coûts entrés ont été mal évalués.

http://www.retscreen.net/fr/speakers_notes_photovoltaic_project_analysis.php

http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/innovation/innovation-solaire.jsp

Pourcentage d'excès d'énergie

Le pourcentage d'excès d'énergie permet de déduire si le système a bien été optimisé. Plus la latitude est élevée, plus le système photovoltaïque a d'excès d'énergie pour pouvoir répondre à la demande énergétique forte en période pour laquelle le gisement est faible. Pour des systèmes près de l'équateur, l'excès d'énergie devrait être presque nul.

Pourcentage des coûts de chaque équipement vs la moyenne

On peut comparer le pourcentage des coûts obtenus par HOMER et le pourcentage normal des coûts des équipements par rapport aux coûts totaux du système. S'il y a des divergences, on doit les expliquer.

Comparaison des valeurs de dimensionnement manuel et des résultats HOMER

Des calculs de pré-dimensionnement manuel des équipements peuvent être comparés aux résultats issus de HOMER. Des calculs approximés de coûts peuvent aussi être comparés aux résultats de HOMER. La situation idéale est que tout soit du même ordre de grandeur. À comparer :

- taille des équipements
- coûts initiaux
- coûts totaux

Il est aussi possible de vérifier les résultats obtenus avec des résultats d'études déjà réalisées et publiées dans des articles de revues ou disponibles sur les sites internet d'organismes reconnus.

ANNEXE 3 – Méthodologie pour l'éolien avec Homer

Pour effectuer le dimensionnement avec le logiciel HOMER, on peut simplement entrer une série de données et le logiciel donne la solution optimale parmi les données soumises. Ce n'est cependant pas nécessairement la solution optimale absolue, mais plutôt la solution optimale parmi les choix soumis. Avec une méthode itérative, on pourrait arriver à la solution optimale pour un lieu donné, mais le processus peut s'avérer long si on n'a pas d'ordre de grandeur de la taille du système. De plus, on n'a aucune base de comparaison pour évaluer la justesse des résultats si on ne fait aucun calcul préalable.

Je préconise donc un dimensionnement préalable à la main de tout le système éolien ; c'est-à-dire le dimensionnement de la puissance des éoliennes et de tout l'équipement associé (batteries, convertisseur, onduleur, etc.). J'ai donc établi une méthodologie afin d'arriver à des résultats concluants en utilisant des calculs manuels et le logiciel HOMER.

Démarche globale pour l'éolien

La démarche globale est logique et élémentaire :

1. Évaluer de la demande énergétique (consommation d'énergie);
2. Pré-dimensionner à la main des panneaux et des équipements;
3. Identifier les équipements nécessaires pour le système (éoliennes, convertisseur, batteries…) dans le logiciel HOMER;
4. Entrer les données nécessaires dans le logiciel :
    d. de consommation énergétique;
    e. de gisement éolien pour le lieu désiré;
    f. des équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien);
5. Lancer le calcul dans HOMER;
6. Optimiser les résultats de HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système;
7. Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire;

8. Valider le système.

L'utilisation du logiciel HOMER est simple et intuitive, mais un travail de recherche en amont doit être fait minutieusement et rigoureusement pour les données entrées, surtout au niveau des coûts des équipements. Si ce travail n'est pas effectué correctement et sérieusement, les résultats obtenus ne représenteront pas un système fonctionnel réel ou du moins plausible.

Étape 1 : Évaluer de la demande énergétique

Les données de consommation doivent préférablement être évaluées. Le tableau 1, un tableau classique pour déterminer la consommation journalière d'une famille ou d'une maison, permet de lister les appareils utilisés (RNCREQ, 2009). Par la suite, on indique la tension, la puissance et le temps d'utilisation par jour des appareils. Une fois ce travail complété, il est possible de faire le total de la consommation de chaque appareil en Wh/j (puissance * temps d'utilisation). Pour le cas des tensions C.A., il faut tenir compte des pertes dues à l'onduleur.

Tableau 1 : Évaluation de la demande énergétique journalière

Nom de l'appareil électrique	Tension C.A. ou C.C.	Puissance Watt	Rendement onduleur pour C.A.	Puissance Watt, avec pertes	Utilisation heures /jour	Total en Wh/j

Lorsque le tableau est complété, on peut sommer la dernière colonne pour obtenir la demande énergétique globale pour une journée en Wh/j. Si des données sont disponibles d'heure en heure ou par jour, il est possible de les utiliser directement dans le logiciel HOMER.

Étape 2 : Pré-dimensionner

Le pré-dimensionnement peut être fait pour tous les équipements principaux. Pour un système éolien hors réseau, il est nécessaire de préalablement dimensionner au minimum la puissance et le nombre d'éoliennes, et je recommande aussi de dimensionner les accumulateurs (système de batteries). Pour de meilleurs résultats, une meilleure analyse et une meilleure compréhension du système, il est mieux de dimensionner tous les équipements importants, régulateur et onduleur inclus. On peut même dimensionner le câblage et les équipements connexes (fusibles, para-foudre, etc.) pour une analyse plus détaillée. Des schémas des éoliennes, des accumulateurs et du câblage peuvent aussi être effectués. Le logiciel HOMER, bien que très bien fait et très utile, n'est qu'un outil. Ainsi, s'il est lancé avec des données farfelues ou erronées, les résultats qu'il produira ne représenteront pas la réalité. Parfois, à cause du format des données entrées, on doit forcer certaines données pour obtenir un système qui représente la réalité.

Il est important de garder en mémoire que les logiciels ne sont que des outils et on se doit de comprendre leur fonctionnement correctement afin d'obtenir des résultats concluants.

2.a. Dimensionnement des éoliennes

Pour le dimensionnement des éoliennes, on peut calculer la puissance maximale pouvant être retirée du vent et la puissance pouvant être retirée d'une éolienne donnée. Pour calculer la puissance maximale pouvant être retirée du vent à une certaine hauteur, deux équations peuvent être utilisées :

Équation 13 : Puissance maximale pouvant être retiré du potentiel éolien

$$P\ max = \frac{1}{2}\, C_p * \rho * A_p * V^3$$

Pmax : puissance maximale pouvant être retirée du vent en W

Cp : coefficient (C_p max = 16/27 ≈ 0.59) sans unité

ρ : densité de l'air en kg/m^3

Ap : aire en m^2

V : vitesse en m/s

(Dubois, 2009) (Mathew, 2006)

Équation 14 : Vitesse du vent en fonction de la hauteur

$$\mathbf{V=Vo*(H/Ho)^{\alpha}}$$

V : vitesse à la hauteur désirée (finale) en m/s

Vo : vitesse à la hauteur initiale en m/s

H : hauteur désirée (finale) en m

Ho : hauteur initiale en m

α : coefficient de rugosité du sol entre 0,1 et 0,4

(Dubois, 2009) et site web de la NASA SSE

En reliant la les 2 équations précédentes, on peut déduire cette équation :

Équation 15 : Puissance en fonction de la hauteur

$$\mathbf{P=Po(H/Ho)^{3\alpha}}$$

P : puissance à la hauteur désirée (finale) en m/s

Po : puissance à la hauteur initiale en m/s

H : hauteur désirée (finale) en m

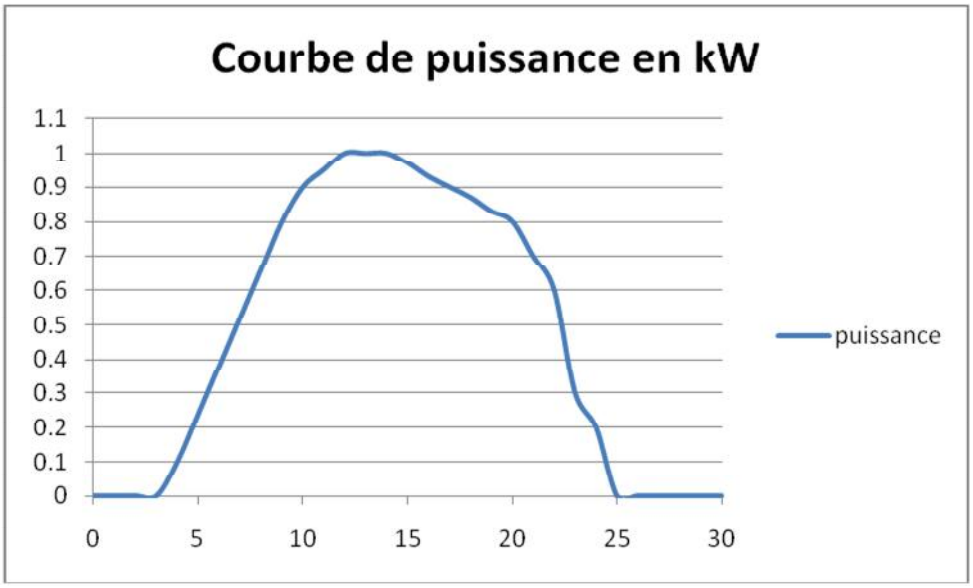
Ho : hauteur initiale en m

α : coefficient de rugosité du sol entre 0,1 et 0,4

(Dubois, 2009)

Si l'on veut connaître la puissance pouvant être retirée d'une éolienne, on doit utiliser sa courbe de puissance afin de déterminer quelle puissance peut être fournie pour une vitesse de vent donnée. Ces courbes sont dans les spécifications des éoliennes soit données sous forme graphique ou de tableaux. Dans certains logiciels comme HOMER et RETScreen, il y a des bases de données de produits offrant le détail des courbes de puissance des éoliennes. En général, il faudrait choisir une éolienne qui fonctionne à une bonne capacité par rapport à sa capacité maximale.

http://www.retscreen.net/fr/templates_1_kw_wind_turbine_off_grid.php



Les données souvent disponibles sont les moyennes de vent mensuelles. D'autres données comme la fréquence et la direction des vents peuvent aussi être trouvées. Le site de la NASA *http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/* et le site Canadian Wind Energy Atlas *http://www.windatlas.ca/en/maps.php* offrent un tableau représentant la distribution des vents selon certains intervalles en fonction de la latitude et la longitude d'un lieu déterminé. Avec ces données, on peut connaître quel intervalle de vent est le plus fréquent.

À partir de la demande énergétique journalière évaluée à l'aide du **Error! Reference source not found.** ou à l'aide de données disponibles, on peut en retirer une valeur moyenne de puissance nécessaire pour le système.

Équation 16 : Puissance moyenne évaluée à partir de la consommation énergétique

$$\mathbf{P_{moy} = E_{elec} / 24hrs/jr}$$

P_{moy} : puissance moyenne en W

E_{elec} : consommation (demande) énergétique en Wh/jr

Dans le cas de données déjà disponibles, l'utilisation du pire cas (plus grande consommation) est appropriée pour le pré-dimensionnement. Ensuite on peut ajouter des pertes (pertes dans le système et pertes de l'onduleur si ce n'est pas déjà pris en compte).

Équation 17 : Puissance avec pertes

$$P_{finale} = P / (C_p * C_{ond})$$

P_{finale} : puissance finale en tenant compte des pertes en W

P : puissance avant pertes en W

C_{ond} : efficacité de l'onduleur en décimale

C_p : coefficient associé aux pertes de courant de sources variées

2.b. Batteries

Le pré-dimensionnement des accumulateurs est aussi déterminant. HOMER permet de définir plusieurs séries de batteries en parallèle. La démarche pour le dimensionnement des batteries est issue du livre Éoliennes et aérogénérateurs (Cunty, 2001). Pour cette démarche, 2 données doivent être trouvées ou estimées : N_1, le nombre de jours consécutifs maximal sans vent productif (vents qui ne font pas démarrer l'éolienne) et N_2, le nombre de jours consécutifs de vent pour lequel il a été entre le vent productif et le vent nominal (vent auquel la puissance nominale de l'éolienne est déterminée). Les seuils de vent productif ou de vent nominal sont dans les spécifications de l'éolienne. Une fois les valeurs de N_1 et N_2 trouvées, on peut estimer le nombre de jours d'autonomie nécessaire.

Équation 18 : Nombre de jours d'autonomie

$$\mathbf{N_1 \leq N_{ja} \leq 1.25 * N_1}$$

$$\mathbf{Si\ N_1 \approx N_2, \quad N_{ja} = N_1}$$

$$\mathbf{Si\ N_1 << N_2, \quad N_{ja} = 1.25 * N_1}$$

N_{ja} : nombre de jours d'autonomie nécessaires en jours

N_1 : nombre de jours consécutifs maximal sans vent productif en jours

N_2 : nombre de jours consécutifs de vent entre le vent productif et le vent nominal

La capacité de la batterie peut ensuite être évaluée soit à partir d'une puissance moyenne ou de la consommation énergétique.

Équation 19 : Capacité de la batterie en Wh à partir de la puissance

$$\mathbf{C_{Wh} = N_{ja} * 24\ hrs/jr * P}$$

C_{Wh} : capacité de la batterie en Wh

N_{ja} : nombre de jours d'autonomie nécessaires en jours

P : puissance nécessaire pour le système en W

Équation 20 : Capacité de la batterie en Wh à partir de la consommation énergétique

$$\mathbf{C_{Wh} = N_{ja} * E_{elec}}$$

C_{Wh} : capacité utile en Wh

N_{ja} : nombre de jours d'autonomie nécessaires en jours

E_{elec} : consommation (demande) énergétique en Wh/jr

Avec la capacité de la batterie en Wh, on peut en déduire la capacité en Ah selon la tension nominale du système.

Équation 21 : Capacité de la batterie en Ah à partir de la consommation énergétique

$$\mathbf{C_{Ah} = C_{Wh} / V_{nom}}$$

C_{Ah} : capacité utile en Ah

C_{Wh} : capacité utile en Wh

V_{nom} : tension nominale du système en V

Équation 22 : Capacité de la batterie, calcul avec coefficients réducteurs

$$\mathbf{C_{nom} = C_{Ah}/(P_d*R_t) = (N_{ja}*B_j)/(P_d*R_t)}$$ (Labouret & Villoz, 2005)

C_{nom} : capacité nominale en Ah

P_d : profondeur de décharge maximale autorisée (généralement 0.7 ou 0.8)

R_t : coefficient réducteur tant compte de la température

(dépend de la batterie choisie)

Des températures basses sont nocives pour les batteries. Il faut donc appliquer un coefficient réducteur qui tient compte de ce fait. On doit aussi connaître la profondeur de décharge du type de batteries choisi (seuil sous lequel la batterie ne peut être déchargée, sinon elle sera endommagée). Avec ces données et la demande énergétique, on calcule la capacité des batteries

et la capacité en tenant compte des coefficients de réduction comme pour le système photovoltaïque et décrit dans Énergie solaire photovoltaïque d'Anne Labouret.

Il faut donc obtenir la tension désirée en mettant plusieurs batteries en série et pour obtenir le système final voulu, il faut mettre plusieurs séries de batteries en parallèle.

2.c. Autres équipements

Le régulateur, le convertisseur et le câblage peuvent aussi être dimensionnés pour une meilleure approximation des coûts. Le dimensionnement des autres équipements accessoires (protections contre la foudre, fusibles, disjoncteurs et autres) est superflu pour une étude macroscopique.

Seul le convertisseur est représenté dans HOMER, si ce dernier est nécessaire. La même logique est utilisée pour le dimensionnement du convertisseur pour le système éolien que pour le système photovoltaïque.

Équation 23 : Dimensionnement du convertisseur/onduleur selon puissance du système

$$\textbf{Puissance}_{\textbf{onduleur}} \textbf{ = coeff* puissance de sortie des éoliennes}$$

Pour système hors réseau :

Coeff : 1.25 à 1.3 (25 à 30% de plus que la puissance des panneaux)

http://www.leonics.com/support/article2_12j/articles2_12j_en.php

Pour système connecté au réseau :

Coeff : 1.1*puissance de l'installation

http://www.infinitepower.org/pdf/FactSheet-24.pdf

Ou

Équation 24 : Dimensionnement du convertisseur/onduleur selon puissance instantanée maximale

$$\textbf{Puissance}_{\textbf{onduleur}} \textbf{ = coeff* puissance instantanée maximale}$$

Coeff : 1.25* puissance instantanée maximale

http://www.infinitepower.org/pdf/FactSheet-24.pdf

Si la puissance instantanée maximale est connue, les 2 calculs sont faits et la valeur maximale est utilisée.

Régulateur

Il est fréquent qu'un régulateur soit inclus à l'achat d'une éolienne, donc il est déjà dimensionné correctement. Dans le cas contraire, le régulateur est dimensionné selon le courant nominal et la tension nominale.

Équation 25 : Dimensionnement du régulateur (courant)

$$\text{Courant} = 1{,}5 * \text{Courant nominal}$$

Équation 26 : Dimensionnement du régulateur (tension)

$$\text{Tension} = 2 * \text{tension nominale}$$

Câblage

Un schéma de câblage peut être effectué, mais n'est pas nécessaire pour l'étude macroscopique.

Étape 3 : Identifier les équipements nécessaires

Cette étape est très rapide. Elle consiste à identifier les équipements nécessaires pour le système qu'on veut modéliser. Dans le cas du système éolien hors réseau, on a besoin de d'éoliennes, de batteries, d'un convertisseur/onduleur, il ne s'agit que de choisir les équipements dans HOMER afin de pouvoir, par la suite, entrer les données qui leur sont associées. Dans la zone « équipement » (*equipment to consider*), il faut aussi inclure la « demande énergétique » *(primary load*). Sans demande énergétique, HOMER donne un message d'erreur, le logiciel étant fait pour optimiser le système de production d'énergie en fonction de la demande énergétique.

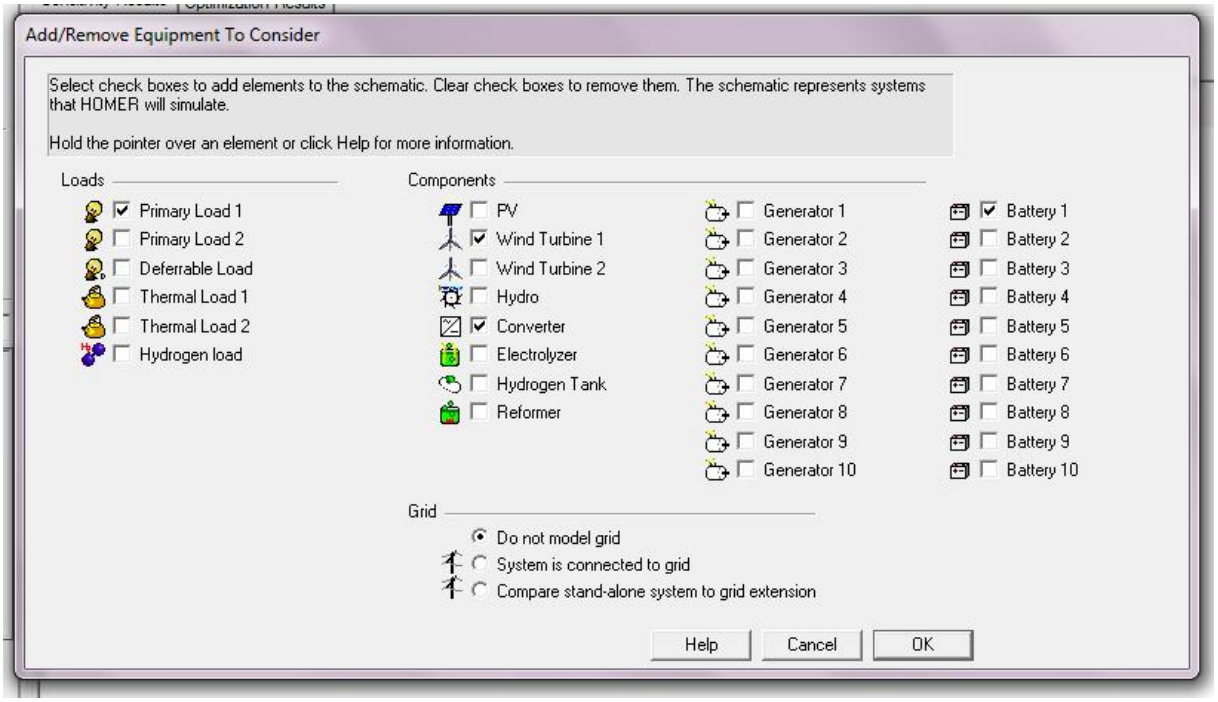


Figure 7.2 : Équipements sélectionnés dans HOMER

Étape 4 : Données à entrer

La qualité et l'exactitude des données entrées sont très importantes parce que le logiciel HOMER se base sur ces données pour effectuer les calculs. Celles-ci ont donc un impact direct sur la justesse des résultats obtenus.

Il est **impératif** de consulter l'aide de HOMER lorsqu'on entre les données.

L'aide décrit ce qu'il faut inclure et définit précisément les termes utilisés dans le logiciel. Parfois, l'aide de HOMER suggère des sites internet à consulter ou même des valeurs à entrer. L'aide est un outil essentiel pour tout projet.

4a. Données de consommation énergétique

Pour les données de consommation énergétique, un profil peut être entré pour chaque heure de la journée et ce pour tous les jours de l'année. Dans le cas où la demande a été évaluée avec le tableau 1, il est bien de déterminer les moments de la journée quand les appareils sont

susceptibles d'être utilisés et de faire un profil de consommation journalier le plus précis possible. Les pointes de consommation pour une résidence sont souvent le matin avant que les gens partent travailler et les soirs, du retour du travail jusqu'au coucher. Cependant, le profil journalier dépend totalement des activités effectuées (résidence, chalet, industrie, observatoire, camp de chasse, etc.) et du mode d'utilisation des équipements.

Il est donc important d'ajuster le profil de consommation à la situation donnée.

4b. Données de gisement éolien

Il est possible d'entrer à la main les données de gisement solaire pour chaque mois ou d'importer un fichier avec des données d'heure en heure. Il est certain que si les données sont disponibles pour toutes les heures de l'année et que le profil de consommation est aussi disponible dans ce format, les résultats seront optimaux.

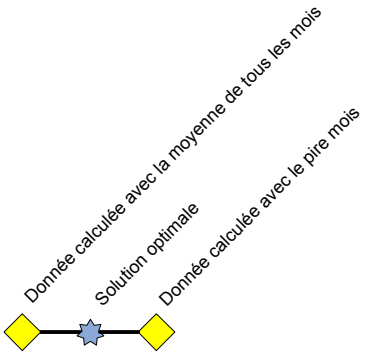
4c. Données d'équipement

Les données pour l'équipement concernent l'équipement qui sera utilisé pour le système de production d'électricité.

Grandeurs à considérer

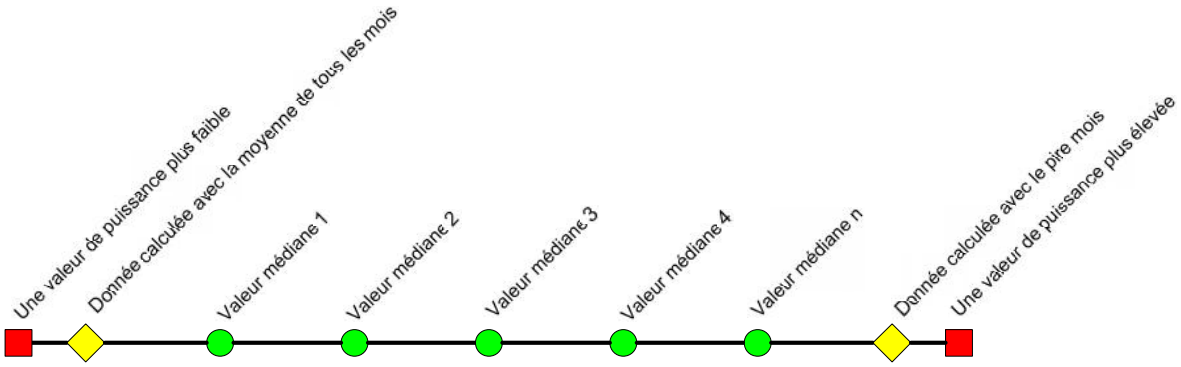
- Éoliennes

À la suite de plusieurs essais et calculs sur HOMER, les données de gisement à utiliser pour le dimensionnement sont la moyenne de tous les mois de l'année et la donnée du pire mois de l'année. La solution optimale calculée par HOMER se situe, en général, entre les valeurs de puissances calculées avec ces données.



Je suggère donc d'utiliser les valeurs suivantes comme entrées dans HOMER pour un premier calcul:

- Une valeur plus faible que la plus petite valeur calculée
- **Donnée de puissance crête calculée avec la moyenne de tous les mois**
- Quelques valeurs médianes
- **Donnée de puissance crête calculée avec le pire mois**
- Une valeur plus élevée que la plus grande valeur calculée



Les valeurs, plus faible et plus élevée, permettent de s'assurer qu'il n'y a pas de solution qui nécessite moins de panneaux ou plus de panneaux que les solutions auxquelles on s'attend.

- Batteries

Il faut entrer les valeurs obtenues par le pré-dimensionnement. Si on a seulement une série de batteries, on doit entrer directement le nombre de batteries désirées. Pour définir plusieurs séries de batteries, on doit entrer le nombre de batteries en série et le nombre de séries de batteries qui seront en parallèle.

- Convertisseur

Il faut entrer la valeur du pré-dimensionnement. On peut mettre d'autres valeurs dans HOMER, mais il faut faire une bonne analyse des résultats optimisés que donnent HOMER dans ce cas à cause du format des données entrées. Les données de demande énergétique sont entrées en kW pour chaque heure de la journée : on entre donc une puissance moyenne sur une heure. HOMER ne connaît donc pas la valeur maximale de puissance instantanée requise par le système.

Coûts des équipements

Les coûts peuvent être trouvés sur de nombreux sites internet en fonction de la région où le projet a lieu. Les sites internet sont de bonnes ressources tant qu'on s'attarde à la fiabilité et à validité de la source (sites d'organismes reconnus ou sites gouvernementaux). Ils sont souvent plus à jour que les livres et plus accessibles que les articles scientifiques. Il est important de porter une attention particulière au lieu géographique et aux prix trouvés : dans certains pays les équipements sont plus chers. Le prix peut être défini selon une moyenne de prix trouvés sur plusieurs sites pour des équipements bien précis ou il peut être déterminé selon des prix généraux. Par exemple, on peut trouver le prix moyen des éoliennes par W au lieu d'un prix pour un modèle précis. Lorsqu'on entre les données, il faut faire attention : le prix doit parfois être entré par équipement (par batterie, par éolienne), et parfois selon la puissance de l'équipement (panneaux solaires, prix pour une certaine puissance).

- Éoliennes

Pour les coûts des éoliennes, on peut entrer plusieurs quantités et le prix associé à ces quantités. Cette possibilité est intéressante parce que les prix n'évoluent pas nécessairement linéairement

selon la quantité, donc en entrant plusieurs coûts selon la puissance de l'équipement, le prix global sera mieux adapté à la situation.

http://www.iea.org/Papers/2008/Wind_Brochure.pdf

coût : investissements : 1.4 à 2.7 M US$/MW pour les grosses éoliennes

O&M : entre 14 et 26 US$ / MWh pour les grosses éoliennes

Prix pour petites turbines : *http://www.canwea.ca/swe/overview.php?id=44*

Puissance :	0.3-1kW	1-30kW	30-300 kW
Coût de l'éolienne	2800 CAN$/kW	3000 CAN$/kW	2200 CAN$/kW
Coûts totaux	5k – 6,4k CAN$/kW	6000 CAN$/kW	3300 CAN$/kW
Entretien et opération	40-130 CAN$/an	1150 CAN$/an	3300 CAN$/an

Liste de manufacturier d'éoliennes :

http://www.windustry.org/companies?filter0%5B%5D=113&filter1%5B%5D=187

- Régulateur

Il est fréquent que le régulateur soit compris avec l'éolienne à l'achat.

Étape 5 : Lancer le calcul

Une fois toutes les données entrées, il faut lancer le calcul sur HOMER. Le temps de calcul est rapide. Les résultats sont ensuite affichés, avec la solution la moins chère en premier. On peut voir tous les résultats de tous les systèmes « *overall* » ou les résultats par type de système « *categorized* ». HOMER produit parfois aussi des avertissements. En général, il ne faut plus avoir d'avertissements, sauf dans certains cas pour lesquels on impose des valeurs. Il faut donc bien comprendre la nature des avertissements et des erreurs donnés par HOMER et agir avec discernement.

Étape 6 : Optimiser les résultats

La phase d'optimisation des résultats est le cœur même de la démarche. L'optimisation se fait de façon itérative, on tient à tendre vers la solution optimale. HOMER donne la solution optimale parmi les grandeurs de système proposées. Le principe est donc simple; on utilise la solution optimale donnée par HOMER, on remet cette valeur dans HOMER ainsi que la valeur au-dessus et au-dessous et des valeurs intermédiaires. On refait le même processus jusqu'à ce qu'on obtienne une solution optimale. On peut se guider avec une donnée intéressante des résultats autre que le coût : l'excès d'énergie du système. Il est certain que l'excès d'énergie est de plus en plus grand pour des latitudes élevées pour des systèmes photovoltaïques hors réseau. Pour des lieux près de l'équateur, il est possible d'avoir un système ayant moins de 5 % d'excès d'énergie et même près de 0 %, ce qui est excellent. Après avoir obtenu le système optimisé, on peut mettre un facteur de sécurité sur la solution trouvée.

Étape 7 : Faire des analyses de sensibilité (facultatif)

Des paramètres jugés influents, ayant une grande incertitude, ou ayant une plus grande variabilité doivent être cernés. Les analyses de sensibilité servent à savoir si, même avec une variation de ces paramètres, les résultats restent les mêmes et sinon, quelles influences ils apportent. Ces paramètres peuvent être : le coût des équipements, le coût de rachat de l'électricité par le réseau, les données de gisement solaire, la demande énergétique. La plupart des données entrées peuvent être utilisées pour des analyses de sensibilité. Celles-ci multiplient le nombre de calculs à effectuer par le logiciel et, par conséquent, le temps de calcul. C'est pourquoi il est préférable de cerner les paramètres les plus sensibles pour notre étude. De plus, ces analyses doivent être exécutées sur les systèmes optimisés pour lesquels les données des systèmes obsolètes ont été enlevées.

Étape 8 : Valider le calcul HOMER

COE – cost of energy

Parmi les résultats, le coût de revient de l'énergie en $/kWh peut être un bon indice pour valider le système.

Pourcentage d'excès d'énergie

Le pourcentage d'excès d'énergie permet de déduire si le système a bien été optimisé. Plus la latitude est élevée, plus le système photovoltaïque a d'excès d'énergie pour pouvoir répondre à la demande énergétique forte en période pour laquelle le gisement est faible. Pour des systèmes près de l'équateur, l'excès d'énergie devrait être presque nul.

Pourcentage des coûts de chaque équipement vs la moyenne

On peut comparer le pourcentage des coûts obtenus par HOMER et le pourcentage normal des coûts des équipements par rapport aux coûts totaux du système. S'il y a des divergences, on doit les expliquer.

Comparaison des valeurs de dimensionnement manuel et des résultats HOMER

Des calculs de pré-dimensionnement manuel des équipements peuvent être comparés aux résultats issus de HOMER. Des calculs approximés de coûts peuvent aussi être comparés aux résultats de HOMER. La situation idéale est que tout soit du même ordre de grandeur. À comparer :

- taille des équipements
- coûts initiaux
- coûts totaux

Il est aussi possible de vérifier les résultats obtenus avec des résultats d'études déjà réalisées et publiées dans des articles de revues ou disponibles sur les sites internet d'organismes reconnus.

Sites consultés

http://www.canwea.ca/swe/faq.php?id=6

http://www.canwea.ca/swe/smallwind.php?id=59

http://www.canwea.ca/swe/overview.php?id=43

ANNEXE 4 – Méthodologie pour le diésel avec Homer

Pour effectuer le dimensionnement avec le logiciel HOMER, on peut simplement entrer une série de données et le logiciel donne la solution optimale parmi les données soumises. Ce n'est cependant pas nécessairement la solution optimale absolue, mais plutôt la solution optimale parmi les choix soumis. Avec une méthode itérative, on pourrait arriver à la solution optimale pour un lieu donné, mais le processus peut s'avérer long si on n'a pas d'ordre de grandeur de la taille du système. De plus, on n'a aucune base de comparaison pour évaluer la justesse des résultats si on ne fait aucun calcul préalable.

Je préconise donc un dimensionnement préalable à la main. J'ai donc établi une méthodologie afin d'arriver à des résultats concluants en utilisant des calculs manuels et le logiciel HOMER.

Démarche globale pour le diesel

La démarche globale est logique et élémentaire :

9. Évaluer de la demande énergétique (consommation d'énergie);
10. Pré-dimensionner à la main des panneaux et des équipements;
11. Identifier les équipements nécessaires pour le système (génératrice, type de combustible : diesel) dans le logiciel HOMER;
12. Entrer les données nécessaires dans le logiciel :
    g. de consommation énergétique;
    h. de gisement solaire pour le lieu désiré;
    i. des équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien);
13. Lancer le calcul dans HOMER;
14. Optimiser les résultats de HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système;
15. Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire;
16. Valider le système.

L'utilisation du logiciel HOMER est simple et intuitive, mais un travail de recherche en amont doit être fait minutieusement et rigoureusement pour les données entrées, surtout au niveau des coûts des équipements. Si ce travail n'est pas effectué correctement et sérieusement, les résultats obtenus ne représenteront pas un système fonctionnel réel ou du moins plausible.

Étape 1 : Évaluer de la demande énergétique

Les données de consommation doivent préférablement être évaluées. Le tableau 1, un tableau classique pour déterminer la consommation journalière d'une famille ou d'une maison, permet de lister les appareils utilisés (RNCREQ, 2009). Par la suite, on indique la tension, la puissance et le temps d'utilisation par jour des appareils. Une fois ce travail complété, il est possible de faire le total de la consommation de chaque appareil en Wh/j (puissance * temps d'utilisation). Pour le cas des tensions C.A., il faut tenir compte des pertes dues à l'onduleur.

Tableau 1 : Évaluation de la demande énergétique journalière

Nom de l'appareil électrique	Tension C.A. ou C.C.	Puissance Watt	Rendement onduleur pour C.A.	Puissance Watt, avec pertes	Utilisation heures /jour	Total en Wh/j

Lorsque le tableau est complété, on peut sommer la dernière colonne pour obtenir la demande énergétique globale pour une journée en Wh/j. Si des données sont disponibles d'heure en heure ou par jour, il est possible de les utiliser directement dans le logiciel HOMER.

Cependant, pour dimensionner une génératrice, des informations supplémentaires sont nécessaires. Ces informations sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Évaluation de la puissance des appareils

Nom de l'appareil électrique	Quantité de cet appareil	Puissance de fonctionnement Watt	Puissance de démarrage Watt	Puissance totale pour ce type d'appareil Watt

Pour des appareils de type résistif, la puissance de fonctionnement est la même que celle de démarrage. Pour des appareils de type réactif, on tient compte pour le calcul de la puissance de démarrage. La puissance totale est donc, pour un appareil résistif, la puissance de l'appareil multipliée par la quantité de cet appareil. Pour un appareil réactif, la puissance totale sera la puissance au démarrage de cet appareil multipliée par la quantité de cet appareil.

Si tous les équipements fonctionnent simultanément, les éléments de la colonne de puissance totale doivent être additionnés.

Étape 2 : Pré-dimensionner

Le logiciel HOMER, bien que très bien fait et très utile, n'est qu'un outil. Ainsi, s'il est lancé avec des données farfelues ou erronées, les résultats qu'il produira ne représenteront pas la réalité. Parfois, à cause du format des données entrées, on doit forcer certaines données pour obtenir un système qui représente la réalité.

Il est important de garder en mémoire que les logiciels ne sont que des outils et on se doit de comprendre leur fonctionnement correctement afin d'obtenir des résultats concluants.

2.a. Dimensionnement de la génératrice

Pour les génératrices, il existe 2 types de charges différentes :

- Charge résistive
- Charge réactive

La charge résistive est similaire à une résistance donc comme une ampoule incandescente ou un système de chauffage électrique. Cette charge est constante et on la calcule en kW (ampères*volts). La charge réactive est plutôt associée aux moteurs, condensateurs ou inducteur et elle est non constante. Notamment, la puissance nécessaire au démarrage est beaucoup plus grande que celle en mode de fonctionnement continu. La charge réactive est exprimée en kAV (ampères*volts*facteur de charge).

En utilisant les informations recueillies pour les tableau 1 et tableau 2, on peut faire un pré-dimensionnement simple.

En sommant la dernière colonne du tableau 2, on trouve la puissance nécessaire à notre système si tous les équipements sont en fonction simultanément. De plus, on suggère de ne jamais utiliser une génératrice à 100% de sa charge maximale pour plus de 30 minutes. On suggère de ne pas dépasser les 90% de la charge de la génératrice. Le fonctionnement optimal d'une génératrice est à 80% de sa charge. On peut donc ajouter un coefficient de sécurité d'au moins 1,1 et même de 1,2.

Si ces informations ne sont pas disponibles, on peut trouver l'heure pour laquelle la puissance maximale moyenne est connue et multiplier cette valeur moyenne par 3 ou 5 afin de tenir compte des puissances de démarrage. Sinon, on ajoute les coefficients de 1.1 ou 1.2 à la puissance instantanée maximale.

Dans la littérature, il est souvent question de systèmes de 7 à 30 kW pour le secteur résidentiel, les petites usines et les petits bureaux. Dans une étude de CanmetÉnergie, on parle d'une génératrice de 5,8kWe pour combler 55,8% des besoins qui sont environ de 24 kWh/j.

Étape 3 : Identifier les équipements nécessaires

Cette étape est très rapide. Elle consiste à identifier les équipements nécessaires pour le système qu'on veut modéliser. Dans le cas du système diesel hors réseau, on a besoin d'une génératrice, il ne s'agit que de choisir les équipements dans HOMER afin de pouvoir, par la suite, entrer les données qui leur sont associées. Dans la zone « équipement » (*equipment to consider*), il faut aussi inclure la « demande énergétique » *(primary load*). Sans demande énergétique, HOMER donne un message d'erreur, le logiciel étant fait pour optimiser le système de production d'énergie en fonction de la demande énergétique.

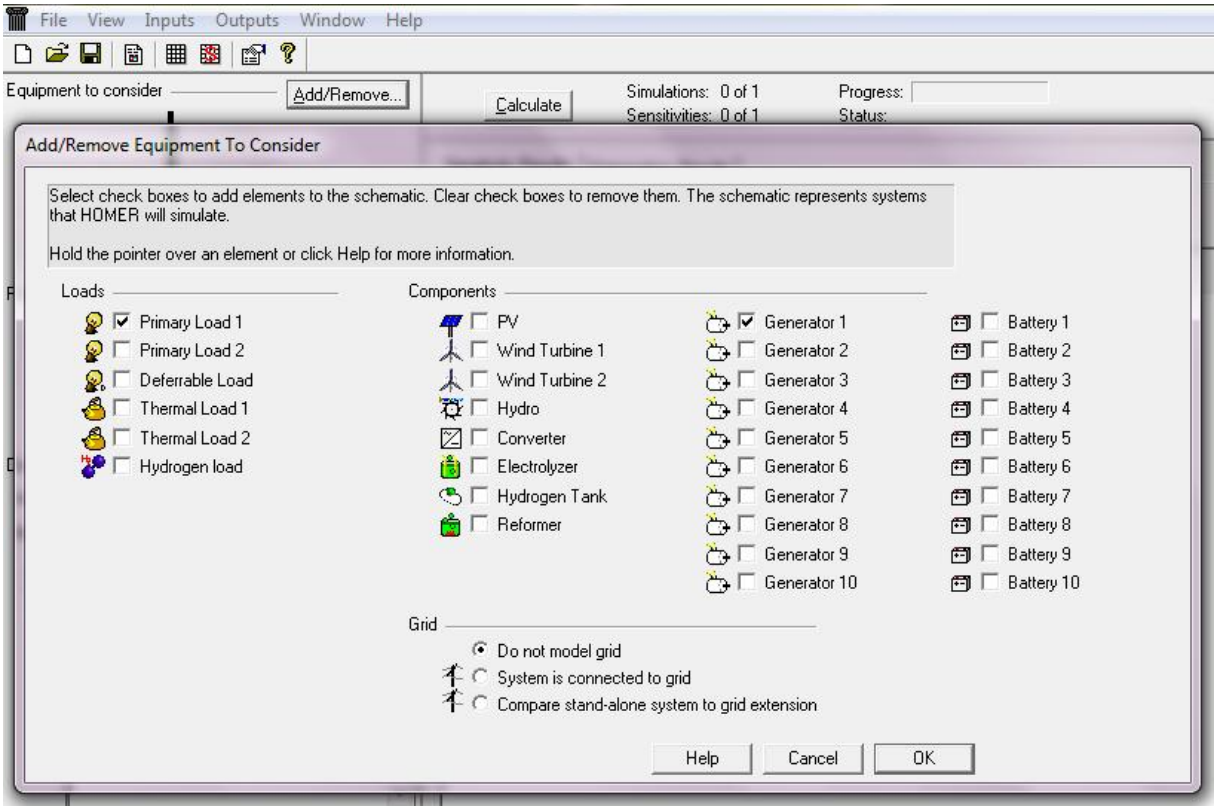


Figure 7.3 : Équipements sélectionnés dans HOMER

Étape 4 : Données à entrer

La qualité et l'exactitude des données entrées sont très importantes parce que le logiciel HOMER se base sur ces données pour effectuer les calculs. Celles-ci ont donc un impact direct sur la justesse des résultats obtenus.

Il est **impératif** de consulter l'aide de HOMER lorsqu'on entre les données.

L'aide décrit ce qu'il faut inclure et définit précisément les termes utilisés dans le logiciel. Parfois, l'aide de HOMER suggère des sites internet à consulter ou même des valeurs à entrer. L'aide est un outil essentiel pour tout projet.

4a. Données de consommation énergétique

Pour les données de consommation énergétique, un profil peut être entré pour chaque heure de la journée et ce pour tous les jours de l'année. Dans le cas où la demande a été évaluée avec le tableau 2, il est bien de déterminer les moments de la journée quand les appareils sont susceptibles d'être utilisés et de faire un profil de consommation journalier le plus précis possible. Les pointes de consommation pour une résidence sont souvent le matin avant que les gens partent travailler et les soirs, du retour du travail jusqu'au coucher. Cependant, le profil journalier dépend totalement des activités effectuées (résidence, chalet, industrie, observatoire, camp de chasse, etc.) et du mode d'utilisation des équipements.

Il est donc important d'ajuster le profil de consommation à la situation donnée.

4b. Données sur le combustible

Principalement, il faut trouver le prix du combustible, donc dans ce cas-ci, le prix du diesel au litre. Les prix varient selon l'endroit où le diesel est acheté. Bien que le prix avant taxes est similaire dans plusieurs pays (autour de 80¢/litre en 2010), les taxes ajoutées pour chaque pays sont différentes. De plus, comme tous les combustibles fossiles, le prix de diesel est en constante augmentation. Il faut donc trouver une donnée à jour pour le prix du combustible. Au Québec, le prix du diesel tourne autour de 1,20$/litre en ce début d'année 2011, par contre il y a eu une pointe à plus de 1,50$/litre en 2009. Il faut donc tenir compte de la variabilité de cette donnée. Une analyse de sensibilité avec le prix du carburant serait justifiée.

http://www.regie-energie.qc.ca/energie/petrole_tarifs.php

http://www.aip.com.au/pricing/marketwatch.htm

http://www.eia.doe.gov/oog/info/gdu/gasdiesel.asp

Pour la consommation, un estimé d'environ 0,30 à 0,4 litre/kWhe peut être utilisé.

4c. Données d'équipement

Les données pour l'équipement concernent l'équipement qui sera utilisé pour le système de production d'électricité.

Grandeurs à considérer

- Génératrices

Il faut entrer les valeurs du pré-dimensionnement. Étant donné le format des données pris en compte dans HOMER, il faut s'assurer d'imposer la valeur de dimensionnement pour que le système soit capable de subvenir aux besoins de la puissance instantanée maximale.

Coûts des équipements

Les coûts peuvent être trouvés sur de nombreux sites internet en fonction de la région où le projet a lieu. Les sites internet sont de bonnes ressources tant qu'on s'attarde à la fiabilité et à validité de la source (sites d'organismes reconnus ou sites gouvernementaux). Ils sont souvent plus à jour que les livres et plus accessibles que les articles scientifiques. Il est important de porter une attention particulière au lieu géographique et aux prix trouvés : dans certains pays les équipements sont plus chers. Le prix peut être défini selon une moyenne de prix trouvés sur plusieurs sites pour des équipements bien précis ou il peut être déterminé selon des prix généraux. Par exemple, on peut trouver le prix moyen des panneaux par W_c au lieu d'un prix pour un modèle de panneaux précis. Lorsqu'on entre les données, il faut faire attention : le prix doit parfois être entré par équipement (par batterie), et parfois selon la puissance de l'équipement (panneaux solaires, prix pour une certaine puissance).

- Génératrices

Pour une génératrice utilisée qu'en cas d'urgence, les coûts initiaux seront les plus importants alors que pour une génératrice qui est la source principale de production d'électricité, ce sont plutôt les coûts en carburants qui seront significatifs. Pour les génératrices de grosses puissances (quelques dizaines de kW), le prix d'achat est aussi peu que 0,60¢/W alors que pour les petites génératrices (moins de 10kW), le prix peut s'élever jusqu'à 1,20$/W.

Pour l'entretien, environ 1,25¢/kWh à 2,5¢/kWh est estimé.

Étape 5 : Lancer le calcul

Une fois toutes les données entrées, il faut lancer le calcul sur HOMER. Le temps de calcul est rapide. Les résultats sont ensuite affichés, avec la solution la moins chère en premier. On peut voir tous les résultats de tous les systèmes « *overall* » ou les résultats par type de système « *categorized* ». HOMER produit parfois aussi des avertissements. En général, il ne faut plus avoir d'avertissements, sauf dans certains cas pour lesquels on impose des valeurs. Il faut donc bien comprendre la nature des avertissements et des erreurs donnés par HOMER et agir avec discernement.

Étape 6 : Optimiser les résultats

La phase d'optimisation des résultats est le cœur même de la démarche. L'optimisation se fait de façon itérative, on tient à tendre vers la solution optimale. HOMER donne la solution optimale parmi les grandeurs de système proposées. Le principe est donc simple; on utilise la solution optimale donnée par HOMER, on remet cette valeur dans HOMER ainsi que la valeur au-dessus et au-dessous et des valeurs intermédiaires. On refait le même processus jusqu'à ce qu'on obtienne une solution optimale. On peut se guider avec une donnée intéressante des résultats autre que le coût : l'excès d'énergie du système. Après avoir obtenu le système optimisé, on peut mettre un facteur de sécurité sur la solution trouvée.

Étape 7 : Faire des analyses de sensibilité (facultatif)

Des paramètres jugés influents, ayant une grande incertitude, ou ayant une plus grande variabilité doivent être cernés. Les analyses de sensibilité servent à savoir si, même avec une variation de ces paramètres, les résultats restent les mêmes et sinon, quelles influences ils apportent. Ces paramètres peuvent être : le coût des équipements, le coût de rachat de l'électricité par le réseau, les données de gisement solaire, la demande énergétique. La plupart des données entrées peuvent être utilisées pour des analyses de sensibilité. Celles-ci multiplient le nombre de calculs à effectuer par le logiciel et, par conséquent, le temps de calcul. C'est pourquoi il est préférable de cerner les paramètres les plus sensibles pour notre étude. De plus, ces analyses doivent être

exécutées sur les systèmes optimisés pour lesquels les données des systèmes obsolètes ont été enlevées.

Dans le cas du système diesel, il serait intéressant de faire une analyse de sensibilité sur le prix du carburant afin de vérifier la robustesse de la solution optimisée trouvée.

Étape 8 : Valider le calcul HOMER

COE – cost of energy

Parmi les résultats, le coût de revient de l'énergie en $/kWh peut être un bon indice pour valider le système. Pour des systèmes de génératrices diesel, ce coût peut être très différent si la génératrice est utilisée seulement pour les cas d'urgence ou si elle est constamment en fonction.

Pourcentage d'excès d'énergie

Le pourcentage d'excès d'énergie permet de déduire si le système a bien été optimisé.

Pourcentage des coûts de chaque équipement vs la moyenne

On peut comparer le pourcentage des coûts obtenus par HOMER et le pourcentage normal des coûts des équipements par rapport aux coûts totaux du système. S'il y a des divergences, on doit les expliquer.

Comparaison des valeurs de dimensionnement manuel et des résultats HOMER

Des calculs de pré-dimensionnement manuel des équipements peuvent être comparés aux résultats issus de HOMER. Des calculs approximés de coûts peuvent aussi être comparés aux résultats de HOMER. La situation idéale est que tout soit du même ordre de grandeur. À comparer :

- taille des équipements
- coûts initiaux
- coûts totaux

Il est aussi possible de vérifier les résultats obtenus avec des résultats d'études déjà réalisées et publiées dans des articles de revues ou disponibles sur les sites internet d'organismes reconnus.

Sites consultés

http://www.powerlite.com.au/default.asp?id=39

http://www.powerlite.com.au/default.asp?id=40

http://www.homepower.htmlplanet.com/solar-vs-diesel-generators.html

http://www.powerlite.com.au/default.asp?id=19

http://www.powerlite.com.au/images/portable%20petrol/average%20watts%20table.pdf

http://www.powerlite.com.au/default.asp?id=28

http://generatorsforhomeuse.org/

http://www.findgenerators.net/Choosing_The_Right_Generator.html

http://www.dieselgeneratorset.us/sizingofdieselgeneratorset.htm

http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_generator

http://www.dieselserviceandsupply.com/Sizing_A_Generator.aspx

ANNEXE 5 – Données entrées pour le photovoltaïque

Simulations HOMER

LOGICIEL : Homer
LIEU : Saint-Hubert (1er cas simulé, explications détaillées)
LATITUDE : 45.5 N = 45 deg 30 min N
LONGITUDE : -73.4 E = 73 deg 24 min O
TYPE DE SYST : PV seul
Nbre de Résidences : 1

Étape 1 : ÉVALUER LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

Pour la demande, le fichier obtenu d'Hydro-Québec est utilisé. La consommation totale du secteur résidentiel est donnée d'heure en heure pour une année entière. Pour obtenir la consommation d'une résidence moyenne j'ai fait :

1 maison moyenne = total conso rés. / nbre de résidences.

Pour chaque mois, j'ai calculé la moyenne de consommation journalière pour le mois. Le pire mois est **janvier avec 84.43 kWh/j**. Cette valeur sera donc utilisée pour le pré-dimensionnement.

Mois	**1**	**rés.**
Janvier	84.43	kWh
Février	74.70	kWh
Mars	62.60	kWh
Avril	46.61	kWh
Mai	33.07	kWh
Juin	29.63	kWh
Juillet	29.08	kWh
Août	30.06	kWh
Septembre	29.11	kWh
Octobre	38.66	kWh
Novembre	54.59	kWh
Décembre	73.96	kWh
Moy./jour Mensuelle	**48.88**	**kWh**

Étape 2 : PRÉ_DIMENSIONNER
2.a. CHAMP DE PANNEAUX

Saint-Hubert	
	RETscreen
	kWh/m2/j
Janvier	1.72
Février	2.80
Mars	4.05
Avril	4.64
Mai	5.73
Juin	6.11
Juillet	6.14
Août	5.18
Septembre	3.85
Octobre	2.52
Novembre	1.49
Décembre	1.34
	3.8

Selon la moyenne journalière du pire mois de consommation, le gisement moyen et le pire gisement mensuel, on peut obtenir 2 valeurs pour la puissance crête.

Nombre d'heures équivalent :
Ne = Esol/1000

Avec la moyenne des gisements
Ne = 3.8 kWh/m2/j / 1000 = 3.8 h/j

Avec le gisement du pire mois
Ne = 1.34 kWh/m2/j / 1000 = 1.34 h/j

Puissance crête :
Pc = Eelec / N
Pcfinale = Pc / (Cp*Cond)
Cond = 0.85
Cp = 0.76 (0.8 pour pertes efficacité batterie * 0.95 pour pertes salissures, neige…)
Cond*Cp=0.646

Consommation du pire mois avec la moyenne des gisements
Pc = 84.43 kWh/j / 3.80 h/j = 22.2 kWc
Pc finale = 22.2 kWc/0.646 = 34.4 kWc

Consommation du pire mois avec le gisement du pire mois
Pc = 84.43 kWh/j / 1.34 h/j = 63.0 kWc

Pc finale = 63.0 kWc/0.646 = 97.5 kWc

Consommation moyenne avec la moyenne des gisements
Pc = 48.88 kWh/j / 3.80 h/j = 12.9 kWc
Pc finale = 12.9 kWc/0.646 = 20.0 kWc

Consommation moyenne avec le gisement du pire mois
Pc = 48.88 kWh/j / 1.34 h/j = 36.5 kWc
Pc finale = 36.5 kWc/0.646 = 56.5 kWc

Pc finale : **20.0 kWc*, **34.4 kWc**, **56.5 kWc*, **97.5 kWc**

Puissance du champ	0-500Wc	500 Wc- 2kWc	2-10kWc	plus de 10kWc
Tension suggérée	12VDC	24VDC	48 VDC	plus de 48VDC

La tension du système devrait donc être d'au moins **48 VDC**.

Si on pose une tension de 48 VDC, on obtient donc des besoins en Ah/j à partir des besoins en Wh/j.

Besoins en Ah/j :
Bj = Eelec / Vnom

Bj = 84.43 kWh/j / 48 VDC = 1,76 kAh/j
**Bj = 84.43 kWh/j / 72 VDC = 1,17 kAh/j*
**Bj = 84.43 kWh/j / 96 VDC = .880 kAh/j*
**Bj = 84.43 kWh/j / 480 VDC = .176 kAh/j*
**Bj = 84.43 kWh/j / 720 VDC = .117 kAh/j*
**Bj = 84.43 kWh/j / 960 VDC = .088 kAh/j*

Courant maximal nécessaire :
Im = Bj / (Esol*Cp)
Cp = 0.76

Avec le gisement du pire mois et 48VDC
Im = 1.76 kAh/j / (1.34 h/j * 0.76) = 1.73 kA
Avec le gisement du pire mois et 960VDC
*Im = 0.088 kAh/j / (1.34 h/j * 0.76) = 0.086 kA=86 A*

Puissance minimale requise pour le système :
Pc = Vm * Im
Vm = 64-68 VDC pour panneaux de 48 V
(Pour 960 VDC, ce serait 20 systèmes de 48 V)

Avec le gisement du pire mois et 48VDC

Pc = 68VDC * 1.73 kA = 117 kW
**(Pc = 68VDC * 0.086 kA = 5.85 kW)*

Pour la puissance crête, on devra donc mettre des valeurs entre 20 et 120 kWc par exemple pour un premier calcul.

Nombre de panneaux global :
**Nbre de panneaux min. : 20kWc / 200Wc/panneau = 100 panneaux*
Nbre de panneaux max. : 120kWc/ 200Wc/panneau = 600 panneaux

Nombre de panneaux en série (Vnom) :
Nbre de panneaux en série : 960 V/ 48 V = 20 panneaux

Nombre de panneaux en parallèle :
Ip : 200 W / 48 V = 4.2 A
*86 A / 4.2 A = 21 panneaux
117000 W / 960 V = 122 A
Nbre de panneaux en parallèle : 122 A / 4.2 A = 30 panneaux

Nombre estimé de panneaux :
20 * 21 = 420 panneaux
20*30 = 600 panneaux

2.b. BATTERIES
Capacité utile :
Cu=Nja*Bj

Cu avec Nja de 3 jrs
Cu= 3 j * 1.76 kAh / j = 5.3 kAh
Cu avec Nja de 5 jrs
Cu= 5 j * 1.76 kAh / j = 8.8 kAh
Cu avec Nja de 8 jrs
Cu= 8 j * 1.76 kAh / j = 14.1 kAh
Cu avec Nja de 10 jrs
Cu= 10 j * 1.76 kAh / j = 17.6 kAh

Du site Nasa SSE :

Equivalent Number Of NO-SUN Or BLACK Days (days)

Lat 45.5

Lon -73.4

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1 day	0.93	0.95	0.89	0.87	0.94	0.9	0.89	0.96	0.9	0.95	0.95	0.96
3 day	2.04	1.89	1.94	2.41	2.46	2.01	1.71	2.03	1.97	2.47	2.1	2.14
7 day	2.88	2.69	3.06	4.43	3.4	3.5	2.55	3.17	3.4	4.86	3.5	3.53
14 day	3.91	4.59	4.33	6.74	3.85	4.1	2.96	4.4	5.49	6.5	4.8	6.67
21 day	4.62	5.11	4.74	6.81	4.99	5	2.85	5.13	5.61	8.28	6.18	7.35
Month	4.51	5.86	3.51	5.98	6.99	5.61	2.63	5.24	5.72	8.98	4.13	7.5

Le pire mois est le mois d'octobre pour lequel il pourrait y avoir 8.98 jours sans apport solaire, cependant le mois d'octobre n'est pas un mois citrique. Les mois critiques sont décembre, janvier et février. Ce sont les mois pour lesquels la demande est grande et le gisement solaire est faible. Parmi ces mois, c'est décembre qui est le pire mois. On pourrait avoir besoin de 7.5 jours de réserve, donc à 8 jrs.

Capacité nominale :
Cnom = Cu / (Pd*Rt)
Pd = .7 (0.7 ou 0.8 normalement)
Rt = .6 (coefficient de température)
Pd*Rt= 0.42

Cnom avec Nja de 3 jrs
Cnom = Cu / (.42) = 12.6 kAh
Cnom avec Nja de 5 jrs
Cnom = Cu / (.42) = 21.0 kAh
Cnom avec Nja de 8 jrs
Cnom = Cu / (.42) = 33.6 kAh
Cnom avec Nja de 10 jrs
Cnom = Cu / (.42) = 41.9 kAh

**Tnom 960V*
Nombre de batteries global :
Nbre de batteries : 33.6 kAh / 200Ah/batterie = 168 batteries

Nombre de batteries en série (Vnom) :
Nbre de batteries en série : 960 V/ 12 V = 80 batteries

Nombre de batteries en parallèle (Cnom) :
Nbre de batteries en parallèle : 168 A / 80 A = 2.1 environ 3 batteries

Nombre estimé de batteries :
*80*2= 160 batteries BON*
*80*3 = 240 batteries*

2.c. AUTRES ÉQUIPEMENTS

Puissance du convertisseur / onduleur
Pond = coeff* puissance de sortie des panneaux
Coeff =1.3
Pond = 1.3*117kW = 152 kW

ou

Pond = coeff* puissance instantanée maximale
Coeff=1.25
Pond=1.25*5.25=6.5625kW

Courant et tension du régulateur / contrôleur (p.214-215 énergie solaire pv)
Courant = 1,5* Courant nominal
Courant = 1.5*1720 A = 2580 A

Tension maximale = 2* tension nominale
Tension = 2*960V = 1920V

Étape 3 : IDENTIFIER LES ÉQUIPEMENTS NÉCESSAIRES - HOMER

Pour la zone « équipement » (equipment to consider) pour le système photovoltaïque seul, 4 icônes sont nécessaires :

- **Demande énergétique (load)**
- **PV**
- **Battery**
- **Converter**

Le réseau n'est pas modélisé puisque c'est un système autonome.

Étape 4 : DONNÉES À ENTRER

4a. DONNÉES DE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

DEMANDE ÉNERGÉTIQUE / LOAD		
	Données	Raison / Commentaires
Type de tension /Load	AC	AC permet d'utiliser les appareils usuels
Data source	Import	Fichier hydro-québec, 1 maison
Baseline data	---	
Random variability		
day-to-day	auto	
time-step-to-time-step	auto	
Scaled annual average (kWh/h)	moyenne	j'ai laissé la moyenne
Efficiency inputs	non	pour le moment aucune donnée entrée, il pourra être intéressant de voir pour une maison pourvue d'équipement spécialement moins énergivore
efficiency multiplier	---	
capital cost $	---	
lifetime yr	---	

La simulation a été faite avec du courant AC, puisque selon én. sol. pv. p.131, ceci permet d'utiliser les appareils usuels, choix beaucoup plus vaste, prix plus avantageux.

4b. DONNÉES DE GISEMENTS SOLAIRES

GISEMENT SOLAIRE / SOLAR RESOURCE		
	Données	Raison / Commentaires
latitude	45deg30min	Lat. de RETScreen mise en deg/min
longitude	73deg24min	Long. de RETScreen mise en deg/min
get data via internet	non	Données HOMER entrées
data source	monthly average	
scaled annual average	moyenne	j'ai laissé la moyenne

4c. DONNÉES D'ÉQUIPEMENTS

PANNEAUX

PANNEAUX SOLAIRES / PV		
	Données	Raison / Commentaires
Costs		http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm
size kW	1 kWc	
capitals $	4140	3.0$/W + 5% régulateur + 10% autres composantes + 13% taxes + 10% pour installation
replacement $	auto	coût du remplacement avant la fin de vie du projet
O&M $/yr	1.656=2	souvent considérée nulle (ref. aide homer) pour panneaux, 1% pour autres composantes inclues
Properties		
Output current	dc	
Lifetime yr	25	la plupart des marchands garantissent 25 ans pour la puissance
Derating factor %	85%	Situation réelle / situation aux conditions standard
Slope degrees	55.5	latitude+10=55.5 ref en sol pv p. 197
Azimuth deg W of S	0	panneaux plein sud
Ground reflectance %	32.5%	20% pour 9 mois (gazon) et 70% pour 3 mois
Advanced		
Tracking sytem	non	
consider effect of temperature	non	
temp coeff of power	---	
nominal op cell temp	---	
eff. at std. Test conditions	---	
Sizes to consider		
	entre 20 et 120 kWc, pas de 5	Essai 1

Prix des panneaux solaires

Le prix pour le pv dans Homer tient compte :

- PV panels
- Mounting hardware
- Tracking system
- Control system
- Wiring
- Installation

Prix des modules seulement
Selon http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm, le prix des panneaux seuls a tendance a diminué. Le prix est de 3.00US$/W peak aux États-Unis et le prix ne tient pas compte des taxes. Les taxes s'élèvent à 5% pour la TPS et à 7.5% pour la TVQ pour un total d'environ 13% (1.05*1.125=1.128). Le prix est valable pour des panneaux de 125 W ou plus, ce qui est nécessaire dans ce cas-ci étant donné la demande élevée en énergie. De façon générale, plus les panneaux ont une puissance élevée plus le prix par watt-crête est faible. Les panneaux représentent environ 50-60% des coûts totaux pour un système photovoltaïque.

Le prix pour le régulateur est d'environ 6$/Amp. 2580 A*6=15480$
Le prix entré dans le logiciel est 3.00 US$/W +5% régulateur + 10% autres composantes + 10% installation + taxes donc, 1.38*3US$/W = 4.14US$/W.

Bien que les panneaux n'ont pas besoin d'entretien, les autres composantes peuvent bien nécessiter un certain entretien donc j'ai estimé à 1% du coût intial/W le prix de l'entretien /W par an. Alors on a : 1kW*4140$/kW*1/100=41.4$. Remis par an : 41.4$/25 ans = 1.656 $/an/kW.

Prix du régulateur
Environ 10% du montant total du système photovoltaïque selon http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm. Dans énergie solaire photoltaïque, on parle de 5% cependant on note que les régulateurs MPT (max power tracking) sont plus onéreux. Je l'ai évalué à 5% du prix des panneaux seuls.

CONVERTISSEUR

CONVERTER		
	Données	Raison / Commentaires
Costs		
size	1 kw	
capitals	848 US$	selon solar buzz + 5% pour installation + taxes 13% = 715*1.05*1.13 = 848$
replacement	848 US$	
O&M	0.57$/yr=1	848*1%/15ans = 0.57$/kW
Inverter inputs		DC to AC
Lifetime	15	Par défaut
Efficiency	90	par défaut
Inverter can operate simultaneously with an AC generator	oui	
Rectifier inputs		AC to DC
Capacity relative to inverter	0%	DC to AC
Efficiency	85%	par défaut
Sizes to consider		
	5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 kW	Essai 1

BATTERIES

BATTERIES / BATTERY		
le choix de batteries influence bcp le prix et l'énergie nécessaire batteries vs panneaux		
	Données	Raison / Commentaires
Battery type	Vision 6FM200D	nom. Voltage: 12 V, nom. Capacity : 200Ah
Costs		Solar buzz
quantity		1 de 200Ah
capitals		200 Ah*.213*1.05*1.13*12V=607$/batterie
replacement		auto
O&M		10%*607/10 an = 6.07
Advanced		
Batteries per string	80	Essai 1
Minimum battery life		
Sizes to consider		
Batteries/strings	1,2,3,4,5	

ÉCONOMIE

ÉCONOMIE / ECONOMICS		
	Données	Raison / Commentaires
Annual real interest rate	6	
Project lifetime	25	
System fixed capital cost	0	
System fixed O&M cost	0	
Capacity shortage penalty	0	

ÉMISSIONS

EMISSIONS		
	Données	Raison / Commentaires
Emissions penalties		
Carbon dioxide		
Carbon monoxide		
Unburned hydrocarbons		
Particulate matter		
Sulfur dioxide		
Nitrogen dioxides		
Limits on emissions		
Carbon dioxide		
Carbon monoxide		
Unburned hydrocarbons		
Particulate matter		
Sulfur dioxide		
Nitrogen dioxides		

CONTRÔLE DU SYSTÈME

CONTRÔLE du SYSTÈME / SYSTEM CONTROL		
	Données	Raison / Commentaires
Simulation		
Simulation time step		
Dispatch strategy		
load following		
cycle charging		
apply setpoint state fo charge		
Generator control		
allow systems with multiple generators		
allow multiple generators to operate simultaneously		
allow systems with generator capacity less than peak load		
Other settings		
allow systems with two types of wind turbines		
allow excess electricity to serve thermal load		
limit excess thermal output		

CONTRAINTES

CONTRAINTES / CONSTRAINTS		
	Données	Raison / Commentaires
Maximum annual capacity shortage		
Minimum renewable fraction		
Operating reserve		
As percent of load		
Hourly load		
Annual peak load		
As percent of renewable output		
solar power		
wind power		
Primary energy savings		
Min prim. en. savings		
Ref electrical eff.		
Ref thermal eff.		

ANNEXE 6 – Données entrées pour l'éolien

Simulations HOMER

LOGICIEL : Homer
LIEU : Saint-Hubert (1er cas simulé, explications détaillées)
LATITUDE : 45.5 N = 45 deg 30 min N
LONGITUDE : -73.4 E = 73 deg 24 min O
TYPE DE SYST : Éolien seul
Nbre de Résidences : 1

Étape 1 : ÉVALUER LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

Pour la demande, le fichier obtenu d'Hydro-Québec est utilisé. La consommation totale du secteur résidentiel est donnée d'heure en heure pour une année entière. Pour obtenir la consommation d'une résidence moyenne j'ai fait :

1 maison moyenne = total conso rés. / nbre de résidences.

Pour chaque mois, j'ai calculé la moyenne de consommation journalière pour le mois. Le pire mois est **janvier avec 84.43 kWh/j**. Cette valeur sera donc utilisée pour le pré-dimensionnement.

Mois	**1**	**rés.**
Janvier	84.43	kWh
Février	74.70	kWh
Mars	62.60	kWh
Avril	46.61	kWh
Mai	33.07	kWh
Juin	29.63	kWh
Juillet	29.08	kWh
Août	30.06	kWh
Septembre	29.11	kWh
Octobre	38.66	kWh
Novembre	54.59	kWh
Décembre	73.96	kWh
Moy./jour Mensuelle	**48.88**	**kWh**

Étape 2 : PRÉ_DIMENSIONNER
2.a. ÉOLIENNES

Saint-Hubert	
	RETscreen
	m/s
Janvier	5.000
Février	5.000
Mars	5.000
Avril	4.700
Mai	4.500
Juin	4.200
Juillet	3.600
Août	3.600
Septembre	3.900
Octobre	4.500
Novembre	4.700
Décembre	4.700
	4.446

D'une éolienne avec aire de 10.2m2 et pire mois :

P max = ½ C_p*ρ*A_p*V^3 = .5*.59*1*10.2*3.6^3 = 140.4 W

D'une éolienne avec aire de 10.2m2 et moyenne pondérée :

P max = ½ C_p*ρ*A_p*V^3 = .5*.59*1*10.2*4.81^3 = 334.85 W

Pmoyenne nécessaire :
P_{moy} = E_{elec} / 24hrs/jr = 48.88 kWh/j / 24 = 2.04 kW
P_{moy} = E_{elec} / 24hrs/jr = 84.43 kWh/j / 24 = 3.52 kW

P_{finale} = P / (C_p*C_{ond}) = 3.52 / .646 = 5.45 kW
Cond = 0.85
Cp = 0.76 (0.8 pour pertes efficacité batterie * 0.95 autres pertes…)
Cond*Cp=0.646

P_{finale}: 5.45 kW

Nombre d'éoliennes Pmax du vent pire mois vs Pfinale :
Pfinale / Pmax = 39 éoliennes

Nombre d'éoliennes Pmax du vent moy pondérée vs Pfinale :
Pfinale / Pmax = 16.3 éoliennes

Selon la courbe de puissance et la fréquence des vents :
Puissance moyenne pondérée : 0.587 kW
Pfinale : 5.45 kW
Nombre d'éoliennes : 9.28 éoliennes

Fréquence des vents du site de la nasa :

Monthly Averaged Percent Of Time The Wind Speed At 50 m Above The Surface Of The Earth Is Within The Indicated Range (%)													
Lat 45.5													
Lon 73.4													
Average	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
0 - 2 m/s	14	15	14	11	15	16	12	12	12	11	13	12	13
3 - 6 m/s	57	59	66	58	58	61	59	52	52	55	60	60	58
7 - 10 m/s	30	25	20	30	27	23	28	35	34	33	27	28	28
11 - 14 m/	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
15 - 18 m/	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19 - 25 m/	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Selon le Canadian Wind Atlas :

```
0 0.00076282
1 0.0420747
2 0.108292
3 0.161668
4 0.185353
5 0.151574
6 0.123038
7 0.0893168
8 0.064446
9 0.0355783
10 0.0178816
11 0.00924647
12 0.00396693
13 0.00222754
14 0.000946045
15 0.000244141
16 3.05176e-05
17 0
18 0
19 0
20 0
21 0
22 0
23 0
24 0
25 0
26 0
```

Courbe de puissance ReDriven 2kW :

vitesse vent	puissance kW
0	0
1	0
2	0
3	0.2
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.9
8	1.5
9	2
10	2.3
11	2.5
12	3
13	2
14	1.5
15	1.3
16	1
17	0.8
18	0.4
19	0.2
20	0.1
21	0
22	0
23	0
24	0
25	0

Puissance du champ	0-500Wc	500 Wc- 2kWc	2-10kWc	plus de 10kWc
Tension suggérée	12VDC	24VDC	48 VDC	plus de 48VDC

La tension du système devrait donc être d'au moins **48 VDC**.

Si on pose une tension de 48 VDC, on obtient donc des besoins en Ah/j à partir des besoins en Wh/j.

2.b. BATTERIES

$$N_1 \leq N_{ja} \leq 1.25*N_1$$
$$\text{Si } N_1 \approx N_2, \quad N_{ja} = N_1$$
$$\text{Si } N_1 << N_2, \quad N_{ja} = 1.25*N_1$$

N_1 : moins de 3m/s : 15% * 31 = 4.65 jrs
N_2 : entre3-4 m/s : 16% *31 = 4.96 jrs
N_{ja} = 5 jours

Avec consommation moyenne
$C_{Wh} = N_{ja} * E_{elec}$ = 5* 48.88kWh/jr = 244.4 kWh
Avec consommation du pire mois

$C_{Wh} = N_{ja} * E_{elec}$ = 5* 84.43kWh/jr = 422.153 kWh

Avec consommation moyenne
$C_{Ah} = C_{Wh} / V_{nom}$ = 244.4 kWh/jr / 48VDC = 5.1 kAh
Avec consommation du pire mois
$C_{Ah} = C_{Wh} / V_{nom}$ = 422.153 kWh/jr / 48VDC = 9 kAh

Avec consommation moyenne
$C_{nom} = C_{Ah}/(P_d*R_t) = (N_{ja}*B_j)/(P_d*R_t)$ = 5.1 kAh / 0.42 = 12.14 kAh
Avec consommation du pire mois
$C_{nom} = C_{Ah}/(P_d*R_t) = (N_{ja}*B_j)/(P_d*R_t)$ = 9 kAh / 0.42 = 21 kAh
Cnom = Cu / (Pd*Rt)
Pd = .7 (0.7 ou 0.8 normalement)
Rt = .6 (coefficient de température)
Pd*Rt= 0.42

Cnom en Wh
Avec consommation moyenne
$Cnom_{Wh}$ = 244.4 kWh / 0.42 = 582 kWh
Avec consommation du pire mois
$Cnom_{Wh}$ = 422.153 kWh / 0.42 = 1005 kWh

Nombre de batteries (200 Ah*12V)
Avec consommation moyenne
582 kWh / 2.4kWh = 243 batteries
Avec consommation du pire mois
1005 kWh / 2.4 kWh = 419 batteries

*(HOMER : 80*2.4 kWh = 192 kWh, 192 kWh*.42 = 80.64 kWh, 80.64 kWh/48.88kWh/jr = 1.6 jrs ou 80.64 kWh/84.43kWh/jr = 0.95 jr)*

2.c. AUTRES ÉQUIPEMENTS

Puissance du convertisseur / onduleur
Pond = coeff* puissance de sortie des éoliennes : 1.3*
Coeff =1.3

Pond = coeff* puissance instantanée maximale
Coeff=1.25
Pond=1.25*5.25=6.5625kW

Étape 3 : IDENTIFIER LES ÉQUIPEMENTS NÉCESSAIRES - HOMER

Pour la zone « équipement » (equipment to consider) pour le système photovoltaïque seul, 4 icônes sont nécessaires :

- **Demande énergétique (load)**
- **Wind turbine**
- **Battery**
- **Converter**

Le réseau n'est pas modélisé puisque c'est un système autonome.

Étape 4 : DONNÉES À ENTRER

4a. DONNÉES DE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

DEMANDE ÉNERGÉTIQUE / LOAD		
	Données	Raison / Commentaires
Type de tension /Load	AC	AC permet d'utiliser les appareils usuels
Data source	Import	Fichier hydro-québec, 1 maison, conso totale
Baseline data	---	
Random variability		
day-to-day	auto	
time-step-to-time-step	auto	
Scaled annual average (kWh/h)	moyenne	j'ai laissé la moyenne
Efficiency inputs	non	pour le moment aucune donnée entrée, il pourra être intéressant de voir pour une maison pourvue d'équipement spécialement moins énergivore
efficiency multiplier	---	
capital cost $	---	
lifetime yr	---	

La simulation a été faite avec du courant AC, puisque selon én. sol. pv. p.131, ceci permet d'utiliser les appareils usuels, choix beaucoup plus vaste, prix plus avantageux.

4b. DONNÉES DE GISEMENTS ÉOLIENS

GISEMENT ÉOLIEN / WIND RESOURCE		
	Données	Raison / Commentaires
Data source	Monthly averages	
Baseline data	RETScreen	Données RETScreen
Other parameters		
Altitude (m)	27	
Anemometer height (m)	10	
Advanced parameters		
Weibull k	Par défaut	

Autocorrection factor	Par défaut	
Diurnal pattern strength	Par défaut	
Hour or peak windspeed	Par défaut	
Scaled annual average (m/s)	moyenne	

4c. DONNÉES D'ÉQUIPEMENTS

ÉOLIENNES

ÉOLIENNES / WIND TURBINE		
	Données	Raison / Commentaires
Turbine type	Redriven 2kW	Données issues de RETScreen
Costs		
quantity	1	(2kW)
capitals $	6000	3000$/kW canwea
replacement $	6000	3000$/kW canwea
O&M $/yr	120	2% capital cost - HOMER
Other		
Lifetime (yrs)	15 ans	Par défaut
Hub height (m)	16 m	Retscreen redriven 2kW
Sizes to consider		

CONVERTISSEUR

CONVERTER		
	Données	Raison / Commentaires
Costs		
size	1 kw	
capitals	848 US$	selon solar buzz + 5% pour installation + taxes 13% = 715*1.05*1.13 = 848$
replacement	848 US$	
O&M	0.57$/yr=1	848*1%/15ans = 0.57$/kW
Inverter inputs		DC to AC
Lifetime	15	Par défaut
Efficiency	90	par défaut
Inverter can operate simultaneously with an AC generator	oui	
Rectifier inputs		AC to DC
Capacity relative to inverter	0%	DC to AC
Efficiency	85%	par défaut
Sizes to consider		

BATTERIES

BATTERIES / BATTERY		
le choix de batteries influence bcp le prix et l'énergie nécessaire batteries vs panneaux		
	Données	Raison / Commentaires
Battery type	Vision 6FM200D	nom. Voltage: 12 V, nom. Capacity : 200Ah
Costs		Solar buzz
quantity		1 de 200Ah
capitals		200 Ah*.213*1.05*1.13*12V=607$/batterie
replacement		auto
O&M		10%*607/10 an = 6.07
Advanced		
Batteries per string	80	Essai 1
Minimum battery life		
Sizes to consider		
Batteries/strings	1,2,3,4,5	

ÉCONOMIE

ÉCONOMIE / ECONOMICS		
	Données	Raison / Commentaires
Annual real interest rate	6	
Project lifetime	25	
System fixed capital cost	0	
System fixed O&M cost	0	
Capacity shortage penalty	0	

ÉMISSIONS

EMISSIONS		
	Données	Raison / Commentaires
Emissions penalties		
Carbon dioxide		
Carbon monoxide		
Unburned hydrocarbons		
Particulate matter		
Sulfur dioxide		
Nitrogen dioxides		
Limits on emissions		
Carbon dioxide		
Carbon monoxide		
Unburned hydrocarbons		
Particulate matter		
Sulfur dioxide		
Nitrogen dioxides		

CONTRÔLE DU SYSTÈME

CONTRÔLE du SYSTÈME / SYSTEM CONTROL		
	Données	Raison / Commentaires
Simulation		
Simulation time step		
Dispatch strategy		
load following		
cycle charging		
apply setpoint state fo charge		
Generator control		
allow systems with multiple generators		
allow multiple generators to operate simultaneously		
allow systems with generator capacity less than peak load		
Other settings		
allow systems with two types of wind turbines		
allow excess electricity to serve thermal load		
limit excess thermal output		

CONTRAINTES

CONTRAINTES / CONSTRAINTS		
	Données	Raison / Commentaires
Maximum annual capacity shortage		
Minimum renewable fraction		
Operating reserve		
As percent of load		
Hourly load		
Annual peak load		
As percent of renewable output		
solar power		
wind power		
Primary energy savings		
Min prim. en. savings		
Ref electrical eff.		
Ref thermal eff.		

ANNEXE 7 – Données entrées pour le diésel

Simulations HOMER

LOGICIEL : Homer
LIEU : Saint-Hubert (1er cas simulé, explications détaillées)
LATITUDE : 45.5 N = 45 deg 30 min N
LONGITUDE : -73.4 E = 73 deg 24 min O
TYPE DE SYST : Diesel seul
Nbre de Résidences : 1

Étape 1 : ÉVALUER LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

Pour la demande, le fichier obtenu d'Hydro-Québec est utilisé. La consommation totale du secteur résidentiel est donnée d'heure en heure pour une année entière. Pour obtenir la consommation d'une résidence moyenne j'ai fait :

1 maison moyenne = total conso rés. / nbre de résidences.

Pour chaque mois, j'ai calculé la moyenne de consommation journalière pour le mois. Le pire mois est **janvier avec 84.43 kWh/j**. Cette valeur sera donc utilisée pour le pré-dimensionnement.

Mois	**1**	**rés.**
Janvier	84.43	kWh
Février	74.70	kWh
Mars	62.60	kWh
Avril	46.61	kWh
Mai	33.07	kWh
Juin	29.63	kWh
Juillet	29.08	kWh
Août	30.06	kWh
Septembre	29.11	kWh
Octobre	38.66	kWh
Novembre	54.59	kWh
Décembre	73.96	kWh
Moy./jour Mensuelle	**48.88**	**kWh**

Étape 2 : PRÉ_DIMENSIONNER
2.a. GÉNÉRATRICE
1.2*puissance max = 1.2*5.25kW = 6.3kW

6.3kW * 1200$/kW = 7560 $ achat
48.88 kWh/j*365 jrs/an*25 ans*0.4L/kWh*1.2$/L=214094.4$ diesel
48.88 kWh/j*365 jrs/an*25 ans*0.025$/KWh = 11150.75$ O&M

7560+214094.4+11150.75=232805.15$ pour 25 ans
48.88 kWh/j*365 jrs/an*25 ans = 446030 kWh
0.52$/kWh

Étape 3 : IDENTIFIER LES ÉQUIPEMENTS NÉCESSAIRES - HOMER

Pour la zone « équipement » (equipment to consider) pour le système photovoltaïque seul, 4 icônes sont nécessaires :

- **Demande énergétique (load)**
- **Generator**

Le réseau n'est pas modélisé puisque c'est un système autonome.

Étape 4 : DONNÉES À ENTRER

4a. DONNÉES DE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

DEMANDE ÉNERGÉTIQUE / LOAD		
	Données	Raison / Commentaires
Type de tension /Load	AC	AC permet d'utiliser les appareils usuels
Data source	Import	Fichier hydro-québec, 1 maison
Baseline data	---	
Random variability		
day-to-day	auto	
time-step-to-time-step	auto	
Scaled annual average (kWh/h)	moyenne	j'ai laissé la moyenne
Efficiency inputs	non	pour le moment aucune donnée entrée, il pourra être intéressant de voir pour une maison pourvue d'équipement spécialement moins énergivore
efficiency multiplier	---	
capital cost $	---	
lifetime yr	---	

La simulation a été faite avec du courant AC, puisque selon én. sol. pv. p.131, ceci permet d'utiliser les appareils usuels, choix beaucoup plus vaste, prix plus avantageux.

4b. DONNÉES POUR LE DIESEL

DIESEL		
	Données	Raison / Commentaires
Price ($/L)	1.2	
Limit consumption to	non	

4c. DONNÉES D'ÉQUIPEMENTS

GÉNÉRATRICE

GÉRÉRATRICE / GENERATOR		
	Données	Raison / Commentaires
Costs		
size kW	1 kW	
capitals $	1200	
replacement $	1200	
O&M $/yr	0.025	
Properties		
Description	Par défaut	
Abbreviation	Par défaut	
Lifetime (operating hours)	Par défaut	
Minimum load ratio (%)	Par défaut	
Type (AC / DC)	AC	
Sizes to consider (kW)		
Fuel	Par défaut	
Schedule	Rien	
Emissions	Par défaut	

ÉCONOMIE

ÉCONOMIE / ECONOMICS		
	Données	Raison / Commentaires
Annual real interest rate	6	
Project lifetime	25	
System fixed capital cost	0	
System fixed O&M cost	0	
Capacity shortage penalty	0	

ÉMISSIONS

EMISSIONS		
	Données	Raison / Commentaires
Emissions penalties		
Carbon dioxide		
Carbon monoxide		
Unburned hydrocarbons		
Particulate matter		
Sulfur dioxide		
Nitrogen dioxides		
Limits on emissions		
Carbon dioxide		
Carbon monoxide		
Unburned hydrocarbons		
Particulate matter		
Sulfur dioxide		
Nitrogen dioxides		

CONTRÔLE DU SYSTÈME

CONTRÔLE du SYSTÈME / SYSTEM CONTROL		
	Données	Raison / Commentaires
Simulation		
Simulation time step		
Dispatch strategy		
load following		
cycle charging		
apply setpoint state fo charge		
Generator control		
allow systems with multiple generators		
allow multiple generators to operate simultaneously		
allow systems with generator capacity less than peak load		
Other settings		
allow systems with two types of wind turbines		
allow excess electricity to serve thermal load		
limit excess thermal output		

CONTRAINTES

CONTRAINTES / CONSTRAINTS		
	Données	Raison / Commentaires
Maximum annual capacity shortage		
Minimum renewable fraction		
Operating reserve		
As percent of load		
Hourly load		
Annual peak load		
As percent of renewable output		
solar power		
wind power		
Primary energy savings		
Min prim. en. savings		
Ref electrical eff.		
Ref thermal eff.		