



Intégration d'une centrale d'énergies renouvelables aux édifices publics de la municipalité d'Esprit-Saint au Bas-Saint-Laurent

Mémoire présentée

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

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

PAR

© MAHDI LAHIANI

juin 2022

Composition du jury :

Hussein Ibrahim, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Mohamed Yasser Hayyani, codirecteur de recherche, UQAR

Iheb Slim, examinateur externe, Aménagement Côté Jardin inc.

Dépôt initial le 24 mai 2022

Dépôt final le 09 juin 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

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

A mon adorable mère

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mon cher père

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mes études.

A mes sœurs

Qui m'ont encouragé tout au long de mes études. Qui m'ont aidé moralement aux moments difficiles. Votre affection et votre soutien m'ont été un grand secours au long de ma vie.

A mes beaux frères

Vous êtes toujours présent pour les bons conseils.

A tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin avec la réalisation de ce travail.

Mahdi

REMERCIEMENTS

Je suis très heureux d'utiliser ces quelques lignes en signe de remerciement et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de cette mémoire. Je tiens à rendre hommage à mon directeur de recherche : M. Adrian Ilinca, qui a suivi ce projet avec sérieux et compétence. Il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de porter au projet, pour sa disponibilité et pour le soutien qu'il m'a prodigué. Je voudrais également remercier M. Mohamed Yasser Hayyani pour les discussions intéressantes et les conseils avisés. Enfin, je tiens à remercier ma famille et tous mes amis pour leur soutien et leurs encouragements.

AVANT-PROPOS

Le projet vise à mettre en place une centrale expérimentale, à vocation scientifique, de production d'énergies renouvelables intégrée aux édifices publics de la municipalité d'Esprit-Saint au Bas-Saint-Laurent. Nous visons l'optimisation de la conversion et de l'intégration de plusieurs énergies renouvelables : l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique) l'énergie éolienne, la biomasse. Un intérêt particulier sera accordé aux systèmes de stockage les plus appropriés pour leur intégration aux bâtiments municipaux, Il est consacré à la recherche technico-économique et mettre en place des solutions d'énergies renouvelables (énergie photovoltaïque et/ou éolienne) pour produire de l'électricité aux édifices publics de la municipalité d'Esprit-Saint. C'est dans ce sens, compte tenu de la forte demande énergétique, c'est-à-dire l'intégration des systèmes d'énergie renouvelable autonome ou connecté au réseau serait une alternative à la réduction des factures énergétiques premières.

RÉSUMÉ

Les petites communautés rurales doivent supporter des édifices publics tant pour les coûts d'opération que d'entretien. La facture la plus importante de chaque édifice est souvent l'énergie et plus spécifiquement le chauffage. Les coûts très élevés du chauffage font que les édifices sont d'une part difficile à entretenir et sont une charge pour la communauté. Sur le plan environnemental, ces édifices sont majoritairement chauffés à mazout et donc génèrent des gaz à effet de serre de façon considérable. Sur le plan social, la difficulté de maintenir ses édifices oblige à faire des collectes pour payer les frais d'opération, ce qui n'est pas productif et démotive les communautés. Ceci constitue un problème majeur pour les collectivités territoriales en milieu rural.

La valorisation des énergies renouvelables disponibles localement représente une solution aux problèmes rencontrés par les communautés à plusieurs égards. Même si les techniques d'énergies renouvelables ont connu un développement important et plusieurs solutions pourraient être adaptées à l'usage des petites communautés, nous remarquons un retard de leur déploiement. Cette faible diffusion dans le milieu municipal résulte d'une méconnaissance des techniques d'énergies renouvelables par les professionnels de la rénovation, architectes, ingénieurs, etc. Lorsque les communautés les consultent, ils n'ont pas de propositions concrètes d'alternatives utilisant les énergies renouvelables.

L'objectif de ce projet découle de cette problématique et vise la mise en place d'une centrale d'énergies renouvelables intégrée aux édifices publics. En plus de répondre aux besoins de municipalité, ce projet sera un site expérimental pour la réalisation de projets de recherche sur le couplage énergétique de plusieurs sources renouvelables, le stockage d'énergie et la gestion optimale des flux énergétiques afin d'atteindre des objectifs spécifiques d'efficacité.

Mots clés : rurales, énergies renouvelables, stockage, efficacité, rénovation

ABSTRACT

Small rural communities must support public buildings for both operating and maintenance costs. The biggest bill for each building is often energy and more specifically heating. The very high cost of heating makes the buildings difficult to maintain and a burden on the community. On the environmental level, these buildings are mostly heated with oil and therefore generate considerable greenhouse gas emissions. Socially, the difficulty of maintaining these buildings forces them to collect money to pay for their operation, which is not productive and demotivates the communities. This is a major problem for local authorities in rural areas.

The use of locally available renewable energy represents a solution to the problems faced by communities in several respects. Even though renewable energy technologies have undergone significant development and several solutions could be adapted for use in small communities, we note a delay in their deployment. This low diffusion in the municipal environment results in a lack of knowledge of renewable energy technologies by renovation professionals, architects, engineers, etc. When communities consult them, they are not aware of the benefits of these technologies. When communities consult them, they do not have concrete proposals for renewable energy alternatives.

The objective of this project stems from this problem and aims at the implementation of a renewable energy plant integrated to public buildings. In addition to meeting the needs of municipalities, this project will be an experimental site for the realization of research projects on the energy coupling of several renewable sources, energy storage and the optimal management of energy flows in order to achieve specific efficiency objectives.

Keywords: renewable energy, storage, efficiency, renovation

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
AVANT-PROPOS.....	xi
RÉSUMÉ.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
TABLE DES MATIÈRES.....	xvii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES.....	xxiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 Ressources énergétiques renouvelables et leurs systèmes de production d'électricité.....	3
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 ÉNERGIE EOLIENNE.....	4
1.2.1 Généralités.....	4
1.2.2 Conception d'un système éolien autonome.....	6
1.3 ÉNERGIE SOLAIRE.....	7
1.3.1 Généralités.....	7
1.3.2 Énergie solaire photovoltaïque.....	7
1.3.3 Énergie solaire thermique.....	22
1.3.4 Conclusion générale.....	25
1.4 ÉNERGIE DE LA BIOMASSE.....	25
1.4.1 Introduction.....	25
1.4.2 Procédés de conversion de la biomasse en énergie.....	26
1.4.3 Conclusion.....	27

1.5	CONCLUSION GENERALE.....	27
CHAPITRE 2 Les contraintes techniques et financières pour les différentes énergies renouvelables.....		
2.1	LES CONTRAINTES DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	29
2.1.1	Avantages.....	29
2.1.2	Inconvénients	30
2.1.3	Progression de l'énergie éolienne au Canada	30
2.2	LES CONTRAINTES POUR ENERGIES PHOTOVOLTAÏQUES	32
2.2.1	Avantages.....	32
2.2.2	Inconvénients	33
2.2.3	Le potentiel photovoltaïque canadien	34
2.2.4	Progression de l'énergie solaire au Canada	35
2.3	LES CONTRAINTES POUR L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE.....	36
2.3.1	Avantages.....	36
2.3.2	Inconvénients	36
2.4	LES CONTRAINTES POUR L'ENERGIE DE LA BIOMASSE	37
2.4.1	Avantages.....	37
2.4.2	Inconvénients	37
2.4.3	Progression de l'énergie de la biomasse au Canada	38
2.5	LE POTENTIEL D'EXPANSION POUR L'ENERGIE RENEUVELABLE.....	39
2.6	COUT MARGINAL DE L'ENERGIE RENEUVELABLE.....	42
2.7	COUT MARGINAL DU STOCKAGE	44
CHAPITRE 3 L'optimisation de la conversion et de l'intégration de plusieurs énergies renouvelables		
3.1	ÉTUDE DU COMPORTEMENT INTELLIGENT D'UN CONTROLEUR FLOU DE SUIVI D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE MAXIMALE.....	47
3.1.1	Introduction.....	47
3.1.2	But l'exploitation de l'énergie maximale du système photovoltaïque.....	47
3.1.3	La configuration du contrôleur flou	49
3.1.4	Extrait du MPP utilisant les méthodes Perturb and Observe (P&O) et Fuzzy.....	51
3.1.5	Conclusion	52

3.2	L'OPTIMISATION DE LA CONVERSION L'ENERGIE EOLIENNE	52
3.2.1	Introduction	52
3.2.2	Minimiser le coût de l'énergie	53
3.2.3	Maximisation de la production annuelle d'énergie.....	53
3.2.4	Minimisation de la masse de la pale.....	54
3.2.5	Contraintes de conception	54
3.3	L'OPTIMISATION DE LA CONVERSION L'ENERGIE BIOMASSE	57
3.3.1	Systèmes de cogénération à la biomasse	57
3.3.2	Cycle de Rankin organique (ORC).....	57
3.4	SYSTEMES DE STOCKAGE ENERGIES RENOUVELABLES	59
3.4.1	Introduction	59
3.4.2	Stockage d'énergie par batteries à flux (FBES).....	60
3.4.3	Stockage de produits chimiques	61
3.4.4	Stockage d'énergie thermique.....	62
3.4.5	Conclusion.....	63
	CHAPITRE 4 Dimensionnement énergétique des édifices	65
4.1	INTRODUCTION	65
4.2	PRESENTATION ARCHITECTURALE DE SES EDIFICES PUBLICS (MAIRIE, CENTRE COMMUNAUTAIRE, ÉGLISE, BIBLIOTHEQUE MUNICIPALE ET ECOLE)	65
4.3	METHODOLOGIE	67
4.3.1	Lecture de puissance.....	67
4.3.2	Calcul de la puissance des différents édifices	68
4.3.3	Étude des heures de fonctionnement.....	68
4.4	DIMENSIONNEMENT MANUEL	68
4.4.1	Prévision de l'énergie quotidienne à produire	68
4.4.2	Calcul du nombre de panneaux pour le champ PV	69
4.4.3	Détermination de la puissance réelle à installer	69
4.4.4	Dimensionnement du régulateur.....	70
4.4.5	Dimensionnement du stockage.....	70
4.5	PRESENTATION DES LOGICIELS HOMER PRO	71
4.6	PRESENTATION DES DONNEES :	71
4.6.1	Bilan de Puissance.....	71
4.6.2	Profil de charge journalière de des édifices publics	72

4.6.3 Profil de charge journalière total.....	73
4.6.4 Bilan énergétique journalier des édifices publics	74
4.7 CONCLUSION	76
CHAPITRE 5 Étude technique : choix des solutions.....	77
5.1 INTRODUCTION	77
5.2 DIMENSIONNEMENT DES SOLUTIONS PROPOSEES	77
5.3 DESCRIPTION DU SYSTEME SOLUTION A	77
5.3.1 Dimensionnement des composants du système	78
5.3.2 Dimensionnement du champ PV	78
5.3.3 Dimensionnement de l'onduleur.....	79
5.3.4 Dimensionnement du stockage	79
5.3.5 Dimensionnement du réseau	79
5.4 DESCRIPTION DU SYSTEME DU SOLUTION B.....	79
5.4.1 Dimensionnement du champ PV	80
5.4.2 Dimensionnement du stockage	81
5.4.3 Dimensionnement de l'éolienne	81
5.4.4 Dimensionnement du réseau	81
5.4.5 Conclusion	81
5.5 ETUDE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE	82
5.5.1 SOLUTION A.....	82
5.5.2 SOLUTION B.....	83
5.5.3 Synthèse	Erreur ! Signet non défini.
CONCLUSION GÉNÉRALE	85
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Le bilan de puissance et le bilan énergétique des édifices publics	75
Tableau 2 Coûts d'investissements de la solution A	82
Tableau 3 Coûts d'investissements de la solution B	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Composition d'une éolienne [1].....	4
Figure 2.Schéma d'une station de fourniture et de production d'énergie électrique par aérogénérateur [2]	6
Figure 3: Structure de base d'une cellule photovoltaïque [4]......	8
Figure 4.Types des cellules photovoltaïques [6].	10
Figure 5. Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV [7]......	11
Figure 6. Module photovoltaïque [8].....	13
Figure 7.Module de 36 cellules connectées en séries et protégé par deux diodes de by-pass [10].	13
Figure 8.Champ photovoltaïque composé de N strings en parallèle [11].....	14
Figure 9. Fonctionnement des diodes bypass [12].....	15
Figure 10.Schéma d'un champ photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti-retour [13].....	16
Une installation photovoltaïque n'est pas seulement constituée de modules. Elle comporte aussi (Figure 11) :.....	17
Figure 11 Constitution d'une installation photovoltaïque [49].....	17
Figure 12.Cycle de durée de vie des batteries[16].....	19
Figure 13. Installation photovoltaïque autonome [19].....	20
Figure 14 : Installation photovoltaïque couplée au réseau [19].....	21
Figure 15: Système hybride [20]	22
Figure 16: Capteur thermique solaire [18].....	23
Figure 17 Accumulation de la puissance éolienne terrestre installée au Canada [24].....	31
Figure 18. Distribution de la puissance éolienne pour chaque province au Canada [24].....	31

Figure 19 Évolution du prix des cellules photovoltaïques [25]	33
Figure 20 Le potentiel photovoltaïque canadien [26]	34
Figure 21 Le potentiel photovoltaïque québécois [26].....	35
Figure 22 La capacité aménagée de l'énergie solaire [27].....	36
Figure 23 La capacité aménagée de l'énergie de la biomasse [30].....	38
Figure 24 Emplacement des centrales alimentées à la biomasse au Canada [30].....	39
Figure 25 Composition de l'énergie selon les combustibles primaires en 2015 et 2040 [30].....	40
Figure 26 Capacité de production des ressources renouvelables [31]	40
Figure 27 La quantité d'émissions de gaz à effet de serre (GES) découlant de la production d'électricité [31]	41
Figure 28 Production nette d'électricité éolienne et solaire au Canada 2005 2018 (en GWh) [31].....	42
Figure 29 Le coût des technologies de production d'énergie renouvelable par rapport aux technologies de production conventionnelles dans certaines circonstances [32]	43
Figure 30 Le coût actualisé de l'énergie éolienne et de photovoltaïque [32]	43
Figure 31 Le coût d'investissement pour production énergie renouvelable par rapport de la production conventionnelle [32]	44
Figure 32 Coût marginal du stockage non subventionné [26]	45
Figure 33 Variation du point de puissance maximale (MPP) avec les variations d'irradiation et de température [33]	48
Figure 34 Le changement de direction du rapport cyclique D pour le suivi du MPP[33].....	49
Figure 35 Configuration du contrôleur flou [33].	50
Figure 36 Organigramme de l'algorithme MPPT perturber et observer (P&O) utilisé [33].....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 37 l'objectif principal d'optimisation des éoliennes [35].....	53
Figure 38 Schéma de section de pale. [35].....	56

Figure 39 Schéma du cycle organique de Rankine [46]	58
Figure 40 Illustration d'une batterie à circulation de type PSB (Polysulfide Bromide Battery) [47]	61
Figure 41 Répartition des différents accumulateurs électrochimiques selon leurs densités d'énergie, leur puissance [47]	62
Figure 42 Stockage d'énergie thermique [48]	63
Figure 43 Présentation des différentes édifices publics	66
Figure 44 Les différents édifices publics de la Municipalité d'Esprit-Saint	67
Figure 45 Profil de charge de l'église Figure 46 Profil de charge de la bibliothèque	72
Figure 47 Profil de charge de la mairie Figure 48 Profil de charge de l'école	72
Figure 49 Profil de charge de centre communautaire	73
Figure 50 La puissance de pic obtenue lors du dimensionnement	74
Figure 51 Taux de répartition énergétique journalière	75
Figure 52 Les différentes solutions proposées	77
Figure 53 Représentation du système : PV + batterie + Réseau	78
Figure 54 Représentation du système : PV +éolienne batteries + réseau	80
Figure 55 Les taux des coûts d'investissements de la solution A Erreur ! Signet non défini.	

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

V	Volts : unité de mesure de la tension
A	Ampères : unité de mesure du courant
W	Watts : unité de mesure de la puissance ($A \times V$)
Wc	Watt crête : unité de mesure de la puissance crête limite des modules photovoltaïques
Wh	Watts heures : unité de la quantité d'énergie consommée ou à utiliser ($W \times \text{heures}$)
Ah	Ampères heures : Unité de mesure des capacités de batteries ($A \times \text{heures}$)
E	Quantité journalière d'énergie à utiliser (Wh)
n	Nombre de jours où le vent n'atteint pas sa valeur minimale
E_b	Quantité d'énergie que doivent fournir les batteries pendant n jours (Wh)
V_b	Tension des batteries (V)
C_b	Capacité de la batterie (Ah)
OEM	Onde Electro Magnétique
G_m	Irradiation solaire moyenne ($kWh/m^2/\text{jour}$)
P_e	Puissance permanente des modules photovoltaïques (W)
m	Nombre d'heures d'utilisation du système de radiotéléphonie
U	Tension d'alimentation de l'équipement radiotéléphonique (V)
E_v	Energie consommée par le système radiotéléphonique en état de veille (Wh)
P	Puissance utile à installer (W)
P_c	Puissance crête de modules à installer (W _c)
N_s	Nombre de modules photovoltaïques à installer
N	Nombre de jours successifs sans ensoleillement susceptibles d'être rencontrés dans la région où est implantée l'installation
U_n	Tension nominale de la batterie (V)

Cu Capacité utile de la batterie (Ah)

Icc Le courant de court-circuit

Vco tension de circuit ouvert

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le projet fait appel à la recherche scientifique et technique pour solutionner les problématiques des petites communautés rurales. Là où en milieu urbain l'entretien des édifices publics pose moins de problèmes, en milieu rural cela devient une problématique majeure de coûts d'énergie, ce qui met en péril plusieurs édifices patrimoniaux ou essentiels pour la vie communautaire.

Dans ce projet nous étudions la mise en réseau de 5 édifices publics de la municipalité d'Esprit-Saint au Bas St. Laurent pour créer un réseau électrique et ainsi diminuer le coût global d'énergie pour la communauté.

Les chapitres 1 et 2 présentent une étude détaillée de la situation énergétique actuelle, l'identification des ressources en énergies renouvelables disponibles et leurs potentiels, identification des contraintes techniques pour les différents systèmes auxiliaires (stockage, système de contrôle et suivi, etc.). Le chapitre 3 propose la conception préliminaire des différents sous-systèmes de production d'énergie, de stockage, de couplage avec les systèmes actuels et du système de contrôle et d'optimisation. Et dans les chapitres 4 et 5 de ce projet, nous étudions la mise en réseau des 5 édifices publics de la municipalité pour créer un réseau électrique pour ainsi diminuer le coût global d'énergie pour la communauté. Globalement, nous présentons les études de faisabilité de la mise en place d'une centrale expérimentale et scientifique en énergie renouvelable et son adaptation aux milieux ruraux.

CHAPITRE 1

RESSOURCES ENERGETIQUES RENOUVELABLES ET LEURS SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

1.1 INTRODUCTION

Une source d'énergie est renouvelable tant que sa consommation ne limite pas son utilisation future. C'est le cas du solaire, de l'éolien, des cours d'eau, des terres et généralement de la biomasse humide ou sèche à l'échelle de la vie humaine. Cela ne s'applique pas aux combustibles fossiles et aux combustibles nucléaires.

Le choc pétrolier en cours depuis les années 1970 a montré qu'il existe des risques économiques et géopolitiques pour la production d'énergie basée sur l'exploitation des ressources fossiles, et que les réserves de ressources fossiles sont inégalement réparties et sujettes à l'épuisement. Les solutions proposées comprennent le renforcement de l'énergie nucléaire émergente. Cependant, si l'option nucléaire a suscité de grandes attentes après son lancement, la réalité est beaucoup moins rose. La plupart des pays industrialisés utilisant cette technologie ont décidé d'arrêter définitivement la construction de centrales nucléaires. De plus, une grande partie du monde pourrait ne jamais être connectée aux réseaux électriques traditionnels, et le coût d'extension des réseaux électriques traditionnels est trop élevé pour les zones éloignées, peu peuplées ou inaccessibles.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Ceux-ci sont utilisés depuis longtemps par l'homme. Dans le passé, moulins à eau, les moulins à vent, le bois de chauffage, la traction animale, les voiliers ont grandement contribué au développement de l'humanité. Par conséquent, les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins nocives pour l'environnement, n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles sont inépuisables ;
- Elles permettent à la production décentralisée de s'adapter aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une indépendance énergétique importante.

Ces énergies renouvelables sont présentées, ainsi que leurs modes de production énergétique dans les paragraphes suivants.

1.2 ÉNERGIE EOLIENNE

1.2.1 Généralités

Comme les énergies fossiles, les énergies renouvelables (hors l'énergie marémotrice et géothermique) sont issues de l'énergie solaire. En fait, le soleil irradie environ $1,74 \cdot 10^{17}$ kilowattheures d'énergie vers notre planète chaque heure. Autrement dit, la puissance reçue par la terre est égale à $1,74 \cdot 10^{17}$ watts [1]. Environ 1% à 2% de l'énergie émise par le soleil est convertie en énergie éolienne.

La technologie éolienne génère de l'électricité à partir d'un élément naturel inépuisable : le vent qui fait tourner les pales. Le principe de fonctionnement convertit cette énergie mécanique en électricité. Utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité

1.2.1.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. La très large majorité des éoliennes installées dans le monde sont des machines à axe horizontal (1, 2 ou 3 pales verticales), car leur rendement est supérieur à celui des autres types d'éoliennes.

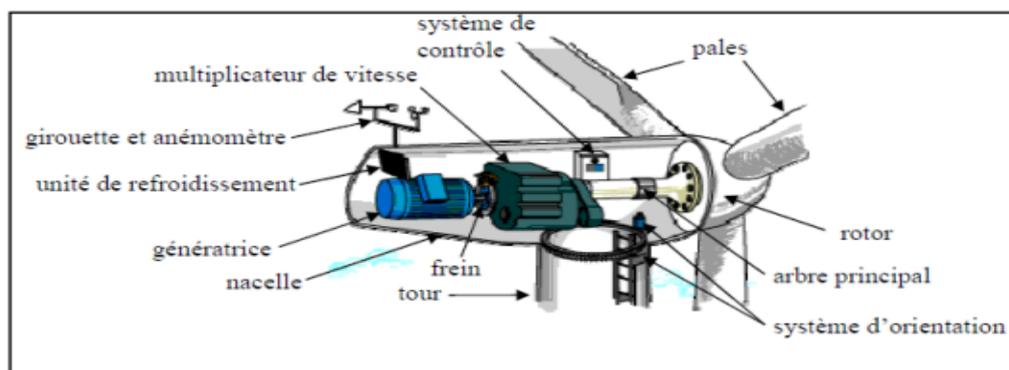


Figure 1. Composition d'une éolienne [1]

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), le système de contrôle de la figure 1 commande au moteur directionnel de placer l'éolienne face au vent, en fonction de la notification de l'anémomètre et de la girouette fixée sur le toit de l'éolienne nacelle. Le vent entraîne les pales de l'arbre en rotation. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation et transfère cette accélération à l'axe rapide. Celui-ci transmet le mouvement de rotation à un générateur qui produit de l'énergie électrique.

Les éoliennes ne fonctionnent pas et ne produisent pas d'électricité en continu. Ils ont besoin d'une vitesse de vent minimale pour commencer à produire de l'électricité. Au lieu de cela, lorsque la vitesse du vent est trop élevée (environ 100 km/h), ils freinent automatiquement puis s'arrêtent. Ainsi, les éoliennes ne produisent de l'électricité qu'entre deux vitesses de vent appelées vitesse de démarrage et vitesse de coupure. Pour ralentir la rotation des éoliennes, le principe des pales de pas ou "pitch control" est souvent utilisé : les pales se déplacent autour de leur axe longitudinal et s'ajustent automatiquement pour réduire la portance au vent. Lorsque la vitesse du vent est trop élevée et que le mécanisme n'est plus suffisant pour ralentir la rotation, l'éolienne est positionnée perpendiculairement au vent (on dit qu'elle se met en drapeau, comme les voiles d'un bateau). Le rotor devient ainsi immobile.

Un autre système de régulation, appelé « stall control » est également parfois utilisé : c'est alors le profil aérodynamique de la pale qui permet à l'éolienne de réguler [2].

Les éoliennes disposent en outre d'un frein mécanique, dit un frein d'urgence (Figure 1). Celui-ci, placé sur l'arbre rapide, permet de suppléer le freinage par les pales en cas de défaillance, ou bien de maintenir l'éolienne en position arrêtée en période de maintenance.

1.2.1.2 Configuration d'une station éolienne pour la production d'électricité

Toutes les stations éoliennes destinées à la production d'énergie électrique ont une configuration qui correspond à l'organigramme de la Figure 2 [2].

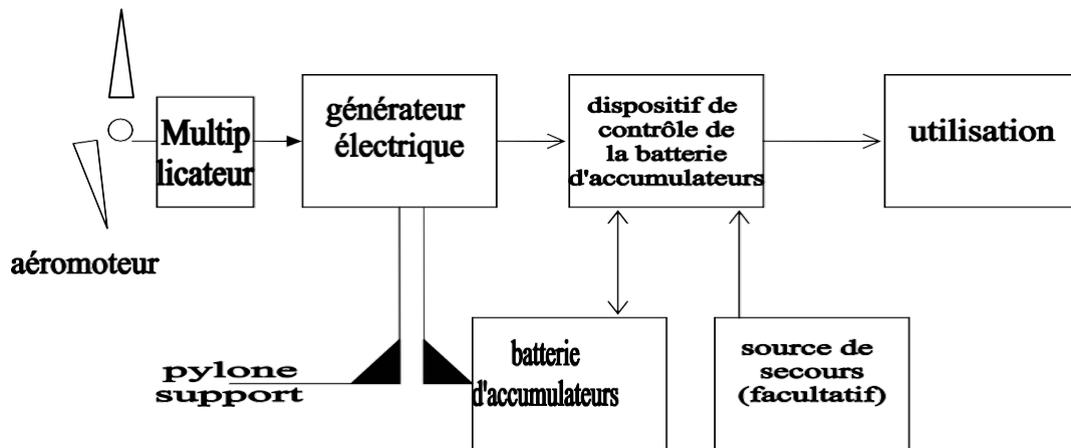


Figure 2. Schéma d'une station de fourniture et de production d'énergie électrique par aérogénérateur [2]

a) LE MULTIPLICATEUR

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance. Il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique [2].

b) LA GENERATRICE ELECTRIQUE

Un générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les éoliennes sont légèrement différentes des autres types de générateurs connectés au réseau. L'une des raisons de cette différence est que les éoliennes doivent pouvoir fonctionner à partir d'une source d'énergie (c'est-à-dire le rotor de l'éolienne) qui fournit une puissance mécanique (couple) très fluctuante.

Les générateurs peuvent être synchrones ou asynchrones. Il produit un courant alternatif à fréquence variable, qui ne peut pas être utilisé dans le réseau de distribution. Par conséquent, il doit d'abord être converti en courant continu. Un redresseur est utilisé pour convertir le courant alternatif à fréquence variable en courant continu. Ce courant est ensuite converti en courant alternatif à fréquence constante, qui est ensuite filtré avec une connexion réseau.

1.2.2 Conception d'un système éolien autonome

C'est un petit système qui n'est pas connecté au réseau et qui peut être autonome s'il est alimenté uniquement par la conversion de l'énergie éolienne, ou peut être mixte s'il est alimenté par l'énergie éolienne, avec une autre source éolienne pour combler le vide. Ce sont des systèmes d'alimentation de 10 kW à 50 kW. La capacité de ces systèmes est suffisante pour assurer l'alimentation d'une installation donnée [2].

1.3 ÉNERGIE SOLAIRE

1.3.1 Généralités

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement à travers environ 150 millions de kilomètres. Son spectre est essentiellement divisé en longueurs d'onde de 0,3 μm et 0,4 μm .

L'atmosphère terrestre perturbe cette distribution spectrale et modifie l'intensité du rayonnement solaire incident, qui est réfléchi, diffusé et absorbé par les gaz, les aérosols et les nuages. Dans les conditions les plus favorables, cette puissance rayonnée atteint environ 1000 watts par mètre carré au sol.

La réponse à de nombreuses demandes nécessite le développement de filières technologiques et de machines adaptées à la conversion de l'énergie solaire. Les capteurs solaires chauffent les piscines, l'eau sanitaire et les maisons, fournissent de la chaleur pour les sèche-linges, les distillateurs et les réfrigérateurs.

Les capteurs solaires à concentration peuvent atteindre des températures élevées d'environ 350°C et, plus complexes, des milliers de degrés. Ils alimentent généralement les installations de transformation des aliments, les usines de dessalement et les centrales solaires thermiques. Enfin, les modules photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en électricité pour une large gamme d'applications : radiodiffusion, téléphone, télévision, éclairage, pompage d'eau, irrigation, réfrigération.

1.3.2 Énergie solaire photovoltaïque

1.3.2.1 Introduction

Le mot 'photovoltaïque' vient du grec 'photo' qui signifie lumière et de 'voltaïque' qui tire son origine du nom d'un physicien italien Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité. L'effet photovoltaïque a été découvert par Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille, mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante-dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Notons que le processus de conversion est indépendant de la chaleur, au contraire, le rendement des cellules solaires diminue quand leur température augmente [3].

1.3.2.2 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques (PV) sont une technologie de récupération d'énergie qui convertit l'énergie solaire en électricité utilisable grâce à un phénomène appelé « effet photovoltaïque » [4-5]. Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques, qui utilisent toutes des semi-conducteurs pour interagir avec les photons du soleil afin de générer du courant électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs couches de matériaux, chacune ayant une fonction spécifique. Les couches les plus importantes des cellules photovoltaïques sont des couches semi-conductrices spécialement traitées. Il se compose de deux couches distinctes (de type p et de type n - voir Figure 4), et c'est cette couche qui convertit l'énergie solaire en électricité utile par un processus appelé l'effet photovoltaïque. Chaque côté du semi-conducteur comporte une couche de matériau conducteur qui "récupère" l'électricité générée. Notez que le côté arrière ou ombragé de la cellule peut être entièrement recouvert de conducteurs, tandis que le côté avant ou émetteur de lumière doit utiliser les conducteurs avec parcimonie pour éviter d'empêcher trop de rayonnement solaire d'atteindre le semi-conducteur. La dernière couche appliquée uniquement sur le côté émettant de la lumière de la cellule est un revêtement antireflet. Étant donné que tous les semi-conducteurs sont naturellement réfléchissants, la perte de retour peut être importante. La solution consiste à utiliser une ou plusieurs couches de revêtements antireflet (similaires à ceux utilisés pour les lunettes et les appareils photo) pour réduire la quantité de rayonnement solaire réfléchi vers la surface de la cellule [4].

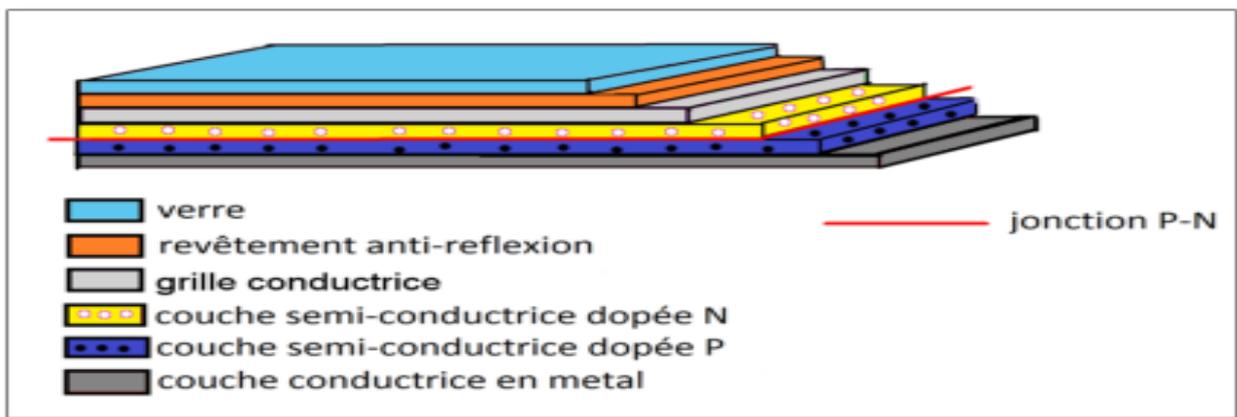


Figure 3: Structure de base d'une cellule photovoltaïque [4].

La tension résultante peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, selon les matériaux utilisés et leur disposition, ainsi que la température et le vieillissement de la batterie.

a) LA CELLULE MONO- CRISTALLIN

Les cellules solaires à base de silicium se répartissent principalement en trois technologies : les cellules en silicium monocristallin, les cellules en silicium polycristallin et les cellules en silicium amorphe utilisant la technologie classique ou ultrafine. Dans ce dernier cas, les deux matériaux traversent un substrat cristallin (monocristallin et polycristallin) déposé sur silicium amorphe hydrogéné ultrafin à recevoir (Fig. 4). Chaque type de cellule correspond à un rendement et un coût [5-6].

b) LA CELLULE POLYCRISTALLINE

La conception d'une cellule polycristalline est la plus simple et consiste en un empilement de cristaux. Ils proviennent aussi du sciage de blocs de cristal, mais ces blocs sont coulés et coûtent moins cher à fabriquer, mais avec des rendements plus faibles, 11 % - 14 % (18 % en laboratoire).

c) LA CELLULE AMORPHE A COUCHE MINCE

Les rendements dans cette catégorie sont faibles (8 % - 10 % ; 13 % en laboratoire), mais ne nécessitent qu'un dépôt très fin de silicium sur des supports généralement flexibles. Souvent utilisé dans les petits produits de consommation comme les calculatrices solaires ou les montres

d) LA CELLULE SOLAIRE HIT

Une cellule solaire HIT consiste en une seule tranche mince de silicium cristallin entourée d'une couche ultra-mince de silicium amorphe [6]. L'acronyme HIT signifie "hétérojonction à couches intrinsèquement minces". Les batteries HIT sont produites par la multinationale électronique japonaise Panasonic. Les cellules solaires HIT présentent de meilleurs coefficients de température que les cellules solaires c-Si à homojonction p/n conventionnelles. Par conséquent, dans la pratique, les cellules solaires HIT peuvent obtenir plus de puissance que les cellules solaires c-Si conventionnelles.

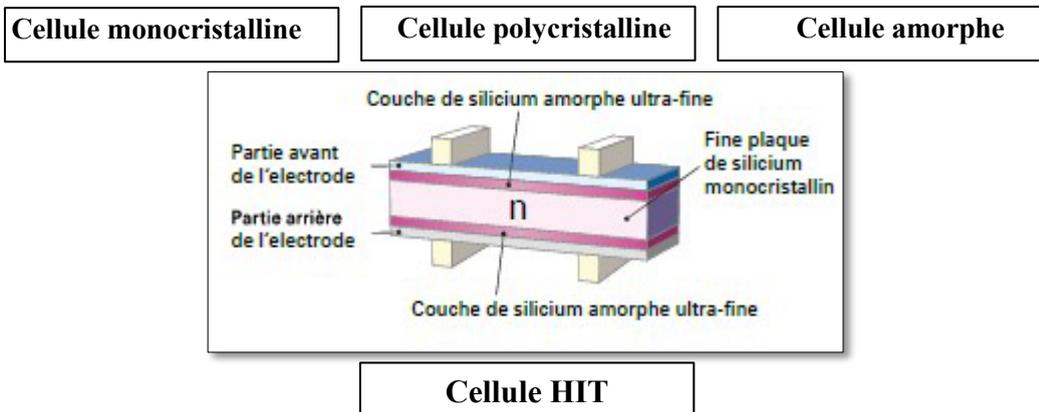


Figure 4. Types des cellules photovoltaïques [6].

1.3.2.3 Caractéristique électrique d'une cellule PV

En fonctionnement nominal, les cellules PV sont utilisées pour produire de l'énergie avec une tension de circuit ouvert (V_{co}) et de courant de court-circuit (I_{cc}) qui correspond au courant quand la cellule est court-circuitée, il est proportionnel à la surface de la cellule et dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant [7].

a) LA COURBE COURANT-TENSION

La caractéristique I-V est la caractéristique essentielle de la cellule solaire qui répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température. Il y a trois points importants dans cette courbe (Figure 5) [7].

- Le point **A** où la tension est égale à zéro et le courant est maximum (courant de court-circuit I_{cc}).

- Le point **B** c'est le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale.
- Le point **C** où le courant est égal à zéro et la tension est maximale (tension de circuit ouvert, V_{co}).

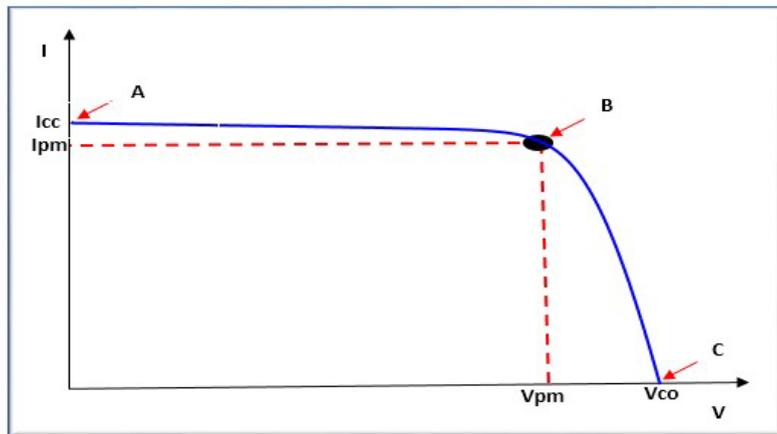


Figure 5. Caractéristique électrique I-V d'une cellule PV [7].

b) LE COURANT DE COURT-CIRCUIT I_{CC} (POUR $V_{CO}=0$)

Le courant de court-circuit I_{cc} : c'est le courant maximal généré par la cellule lorsqu'elle est soumise à un court-circuit $V = 0$ pour un éclairage « plein soleil », Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue sur la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule [7].

c) LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT V_{CO} (POUR $I_{CC} = 0$)

La tension de circuit ouvert V_{co} est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré est $I = 0$. V_{co} , s'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule [7].

d) LA PUISSANCE MAXIMALE, LE POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (PPM)

La cellule solaire fournit des puissances différentes selon le point de fonctionnement dans lequel elle est utilisée. Le point où la puissance maximale est obtenue est appelé le point de puissance maximale (PPM). Comme la puissance d'un point de fonctionnement correspond toujours à la surface $V \times I$, cette zone doit être au maximum dans le cas de PPM. Ce cas est représenté dans la figure 5, où les valeurs du courant et de la tension associée au PPM sont appelées I_{PPM} et V_{PPM}

$$P_{PPM} = V_{PPM} \times I_{PPM} \quad (1)$$

e) *FACTEUR DE FORME (FF)*

Le FF est défini comme le rapport entre la puissance maximale de la cellule solaire et le produit de Voc et Icc, de sorte que :

Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et il diminue avec la température [7], son expression est donnée par : $FF = (\text{puissance maximale délivrée sur la charge}) / (V_{co} \times I_{cc})$.

$$FF = \frac{(V_{PMM} \times I_{PMM})}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{I_{PMM}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (2)$$

f) *RENDEMENT DE LA CONVERSION (H)*

C'est la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Le rendement d'une cellule solaire est déterminé par la proportion de la puissance reçue qui est convertie en électricité et est défini comme suit [7] :

$$\eta = \frac{P_{PPM}}{P_{opt}} = \frac{P_{PPM}}{E \times S} = \frac{(V_{max} \times I_{max})}{E \times S} \quad (3)$$

Où,

S : La surface de la cellule solaire.

E : Rayonnement solaire.

1.3.2.4 Le module photovoltaïque

L'énergie produite par une seule cellule photovoltaïque n'est pas suffisante pour un usage général. En règle générale, une seule cellule photovoltaïque produit une tension et un courant de sortie relativement faibles. Les modules photovoltaïques sont composés de plusieurs ensembles de cellules photovoltaïques en série et en parallèle, et le dispositif de protection représente l'unité de conversion dans le système de production d'énergie. En connectant plusieurs cellules en série, la tension du module PV est augmentée, les pertes de conduction dans le câble sont minimisées et la connexion en parallèle des cellules augmente le courant. Les modules photovoltaïques représentent un élément essentiel pour la production de masse d'énergie photovoltaïque. La plupart des modules commerciaux se composent de 36 ou 72 cellules. Les modules se composent d'une face avant transparente, de cellules

photovoltaïques encapsulées et d'une face arrière. Le matériau du panneau avant est généralement en verre trempé à faible teneur en fer (Figure 6). Le rendement d'un module PV est inférieur à celui d'une cellule PV, car une partie de l'irradiation solaire est réfléchiée par la couverture en verre et l'ombre portée du cadre [8-9].

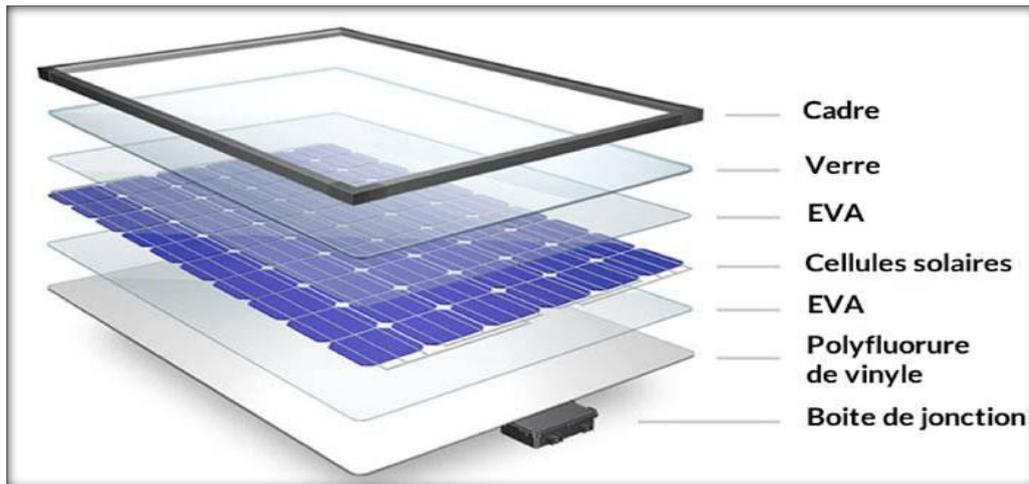


Figure 6. Module photovoltaïque [8]

Pour protéger les modules PV des points chauds causés par un éclairage déséquilibré, une "diode de dérivation", diode au silicium, doit être installée en parallèle à la tête et à la queue de la branche (Figure 7). Généralement dix-huit batteries sont connectées en série, cette diode conduira lorsqu'une ou plusieurs batteries sont ombrées, et sera bloquée dans des conditions normales.

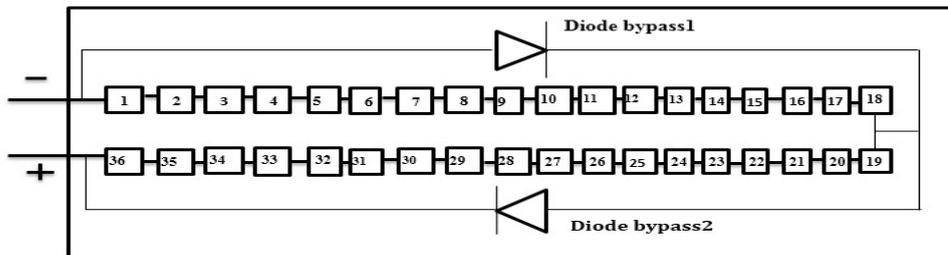


Figure 7. Module de 36 cellules connectées en série et protégé par deux diodes de by-pass [10].

1.3.2.5 String et champ photovoltaïque

Les modules peuvent également être connectés en série pour obtenir une tension accrue ou en parallèle pour obtenir un courant accru afin d'obtenir une puissance élevée dans la production à grande échelle [11]. La connexion des modules PV est classée comme suit :

- String PV : Elle est composée de plusieurs modules connectés en série comme dans la figure 8.

- Champ PV (système) : Il est constitué de N string connectés en parallèle comme indiqué dans la Figure 8.

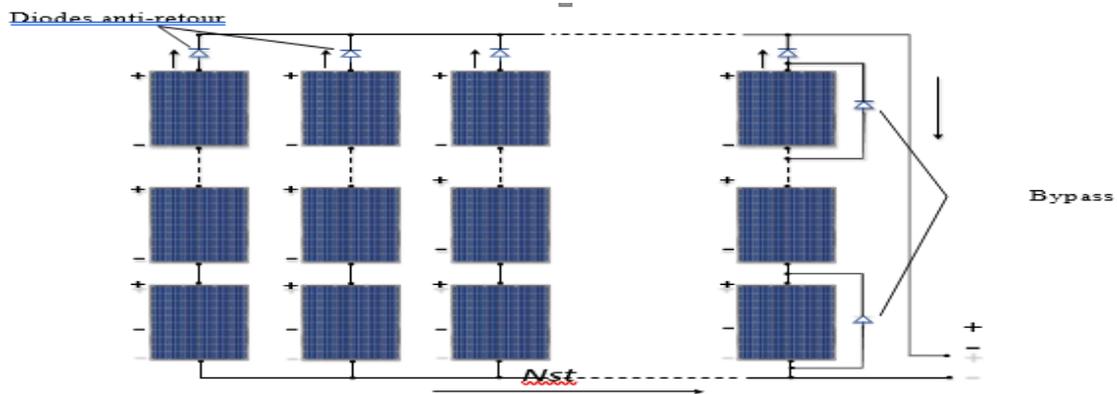


Figure 8. Champ photovoltaïque composé de N strings en parallèle [11]

Avec : N le nombre de strings branchés en parallèle.

1.3.2.6 Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception d'installations photovoltaïques, il est important d'assurer leur protection électrique pour en augmenter la durabilité en évitant les défaillances destructives dues à l'association des cellules et à leur fonctionnement. Pour se prémunir contre ces risques, deux types de protection sont utilisés dans les installations photovoltaïques : les diodes by-pass et les diodes anti-retour, comme le montrent les Figures 9 et 10.

a) *DIODES DE BY-PASS*

Comme le montre la Figure 9, la cellule ombrée cesse de produire de l'énergie électrique et se comporte davantage comme une résistance semi-conductrice. Donc elle génère moins de courant que les deux autres cellules, ce qui diminue fortement la production d'énergie de la chaîne. Par conséquent la puissance générée par les cellules « ensoleillées » sera dissipée par la cellule « ombrée » qui peut,

avec le temps, provoquer une surchauffe (points chauds) et éventuellement la destruction de la mauvaise cellule [12].

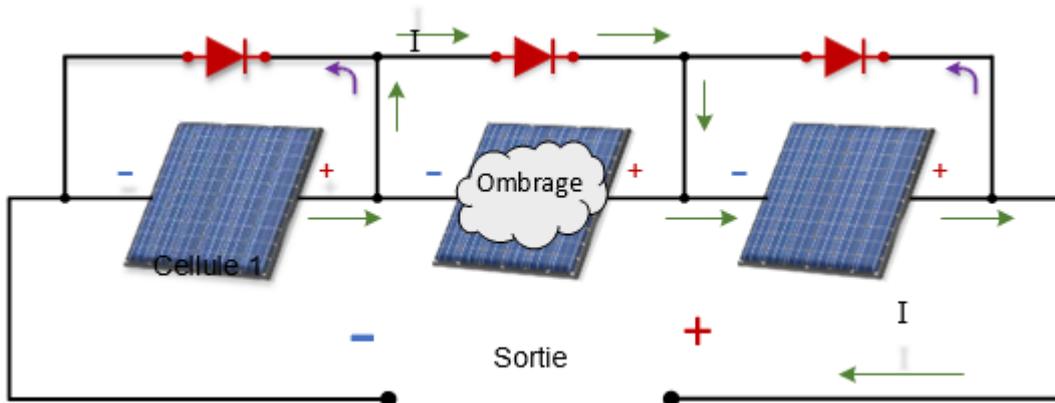


Figure 9. Fonctionnement des diodes bypass [12].

Les diodes de by-pass sont connectées à l'extérieur et en antiparallèle avec chaque cellule PV pour fournir un chemin électrique alternatif pour le courant généré, car il ne peut pas traverser la cellule lorsqu'il est ombragé. Cela permet de préserver les performances de la chaîne en limitant la tension de polarisation inverse générée à travers n'importe quelle cellule partiellement ombragée et donc de réduire la puissance électrique qui peut être dissipée par la cellule [12].

b) *DIODES ANTI-RETOUR*

Lorsque le soleil brille, la tension générée par les panneaux est supérieure à la tension de la batterie, la charge se produit donc. Cependant, la nuit, lorsque les panneaux ne produisent pas de tension, la tension de la batterie fait circuler le courant à travers les panneaux dans la direction opposée, déchargeant la batterie. Dans de tels systèmes, des diodes anti-retours sont nécessaires pour charger la batterie. Les diodes de blocage sont souvent incluses dans la construction des panneaux solaires (Figure 10) [13].

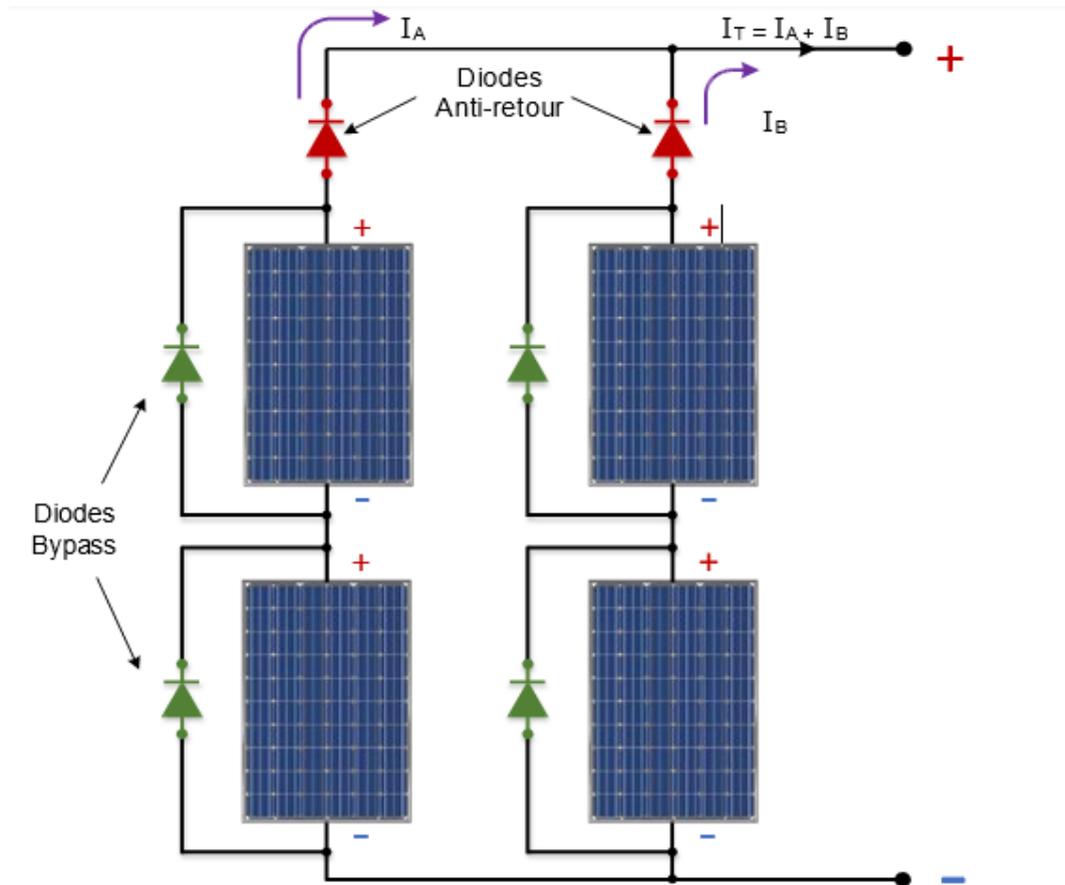


Figure 10. Schéma d'un champ photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti-retour [13].

1.3.2.7 Les installations photovoltaïques

Plusieurs cellules photovoltaïques avec une tension d'environ 0,5 V doivent être connectées ensemble pour former un module. La conception modulaire offre une protection contre les intempéries, afin d'assurer une durée de vie suffisante (20 à 30 ans pour les cellules en silicium cristallin. 20 à 30 ans pour les cellules en silicium amorphe). Les cellules de silicium le sont beaucoup moins. De cette façon, les deux conducteurs électriques en sortie du module peuvent être utilisés pour connecter le module à un circuit externe. La principale caractéristique d'un module PV est sa puissance nominale (appelée improprement puissance crête, car rarement dépassée). Cette puissance correspond aux conditions selon les normes internationales [14], il s'agit notamment des éléments suivants :

- D'un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 ,
- D'une température interne des cellules de $25 \text{ }^\circ\text{C}$,
- D'un spectre du rayonnement AM 1.5.

Une installation photovoltaïque n'est pas seulement constituée de modules. Elle comporte aussi (Figure 11) :

- Des châssis et supports pour l'installation et la fixation des modules sur le site et pour leur orientation optimale vers le soleil.
- Des accessoires de câblage (câbles, protection anti-foudre...).
- Un onduleur, lorsqu'il faut convertir le courant continu issu des modules photovoltaïques en courant alternatif nécessaire à beaucoup d'appareils électriques.
- Un système de stockage de l'énergie électrique issue du panneau photovoltaïque (ensemble de modules photovoltaïques).

Dans les installations photovoltaïques, le stockage remplit deux fonctions principales :

- Malgré l'aléatoire et la discontinuité du soleil (rythme circadien, qui varie selon l'heure de la journée et la saison), il peut tout de même répondre à la demande.
- En réglant la tension du système, il agit comme un tampon entre la production et l'utilisation.

Le système de stockage est constitué d'une batterie fixe, car elle est nécessaire pour stocker l'énergie et la restituer en cas de coupure de courant ou il n'y a pas de soleil dans notre exemple. La batterie la plus largement utilisée est une batterie électrochimique au plomb

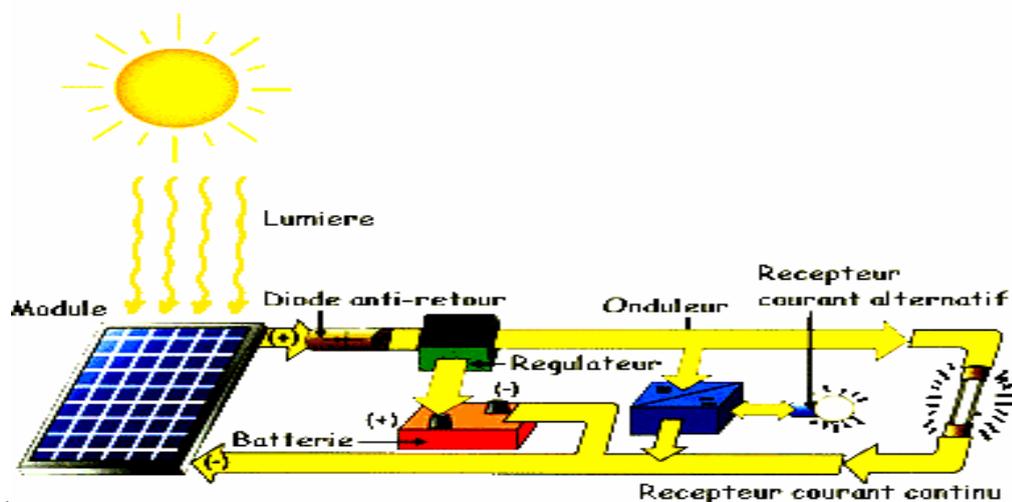


Figure 12 Constitution d'une installation photovoltaïque [49]

1.3.2.8 LES CONSTITUANTS DE BASE D'UNE INSTALLATION À ÉNERGIE RENOUELABLE, ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

Pour produire de l'énergie solaire et éolienne, d'autres éléments doivent être ajoutés pour former une installation d'énergie renouvelable autonome qui n'est pas connectée au réseau. Les principaux éléments à ajouter sont :

a) *UN ONDULEUR*

Le but de l'onduleur est de convertir le courant continu (DC) des générateurs photovoltaïques et des éoliennes en courant alternatif (AC). Cet outil est nécessaire si notre appareil fonctionne en mode alternatif. Par conséquent, avant de faire une sélection, il faut s'assurer de faire la distinction entre l'alimentation CA et l'alimentation CC. Côté DC, il faut additionner la puissance maximale de chaque appareil [14].

b) *DES BATTERIES*

Les batteries sont un élément essentiel des installations d'énergie renouvelable autonomes qui peuvent stocker l'énergie solaire et éolienne. Différents types de batteries peuvent être utilisés, tels que les batteries plomb-acide, les batteries lithium-ion, les batteries lithium-polymère, etc. Les batteries au plomb sont les plus utilisées en raison de leur faible coût.

Ceci est particulièrement important, car une durée de vie typique d'une batterie est inférieure à 10 ans, ce qui constitue une grande partie du coût d'une installation autonome [15].

Les caractéristiques des batteries utilisées dans les stations d'énergie renouvelable sont les suivantes :

- Tension nominale : La tension nominale de la batterie est la tension de fonctionnement de la batterie. Les batteries utilisées dans les applications d'énergie renouvelable sont généralement évaluées à 12 V, 24 V ou 48 V.
- Capacité de la batterie

La capacité énergétique d'une batterie est proportionnelle à la quantité de matériau d'électrode dans la batterie. C'est la tension nominale de la batterie en volts multipliée par la capacité de la batterie en ampères-heures [16]. :

$$E_{batt} = C_{batt} \times V \quad (4)$$

où :

E_{batt} : Capacité d'énergie ;

C_{batt} : Capacité mesurée (Ah) ;

V : Tension nominale mesurée (V).

➤ Charge :

Un autre paramètre important de la batterie est l'état de charge, qui est défini comme le pourcentage de capacité de la batterie disponible pour la décharge. Le générateur solaire charge la batterie qui lui est connectée en fournissant un courant de charge à la batterie.

➤ Décharge

La profondeur de décharge ou DoD (*Depth of Discharge*) est un paramètre important, défini comme le pourcentage de capacité de la batterie déchargée. Ceci est fait par le récepteur qui lui est couplé en tirant le courant de décharge de la batterie.

➤ Le cycle de durée de vie

La durée de vie est définie comme le nombre de cycles de charge-décharge après lequel la capacité de la batterie est inférieure à la valeur nominale. Habituellement, cette durée de vie est spécifiée par le fabricant de la batterie sous forme de nombre absolu. Mais en réalité ce nombre dépend des paramètres cités plus haut en plus de la température. Les graphiques de la figure 12 ci-dessous montrent, de gauche à droite, (a) la durée de vie d'une batterie au plomb en fonction du DoD à différentes températures, et (b) l'effet de la température sur la capacité de la batterie.

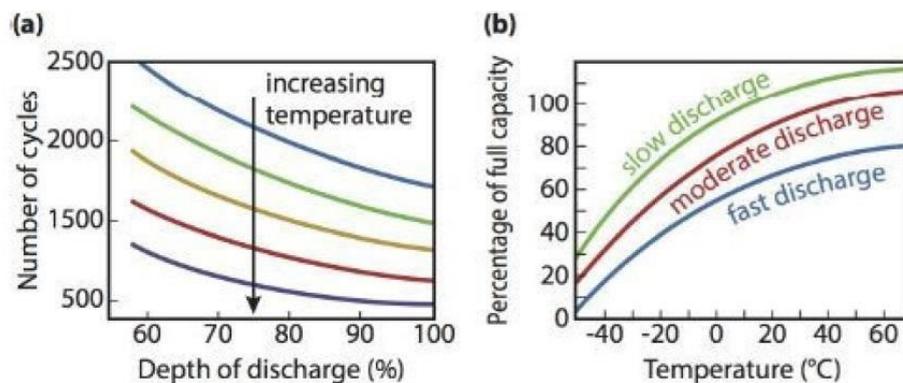


Figure 13.Cycle de durée de vie des batteries[16]

D'après la Figure 12 (a), les températures de fonctionnement plus froides signifient des durées de vie plus longues. En outre, le cycle de durée de vie dépend fortement de la profondeur de décharge (DoD). Plus le DoD est petit, plus le cycle de durée de vie est élevé.

1.3.2.9 Différents types de système photovoltaïques

Les systèmes PV peuvent être réalisés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride [19].

a) SYSTEME PV AUTONOME

Autonomes ou "standalone", ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent garantir que les demandes de charge sont toujours couvertes. Les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent fournir de l'électricité là où il n'y a pas de réseau. Par conséquent, l'énergie générée est utilisée immédiatement (pompage, éclairage, etc.) ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure [19] (Figure 13). Le système PV autonome est composé principalement de :

- Un Générateur photovoltaïque
- Un Convertisseur DC/DC (Hacheur)
- Un système de régulation (commande MPPT)
- Une charge
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur

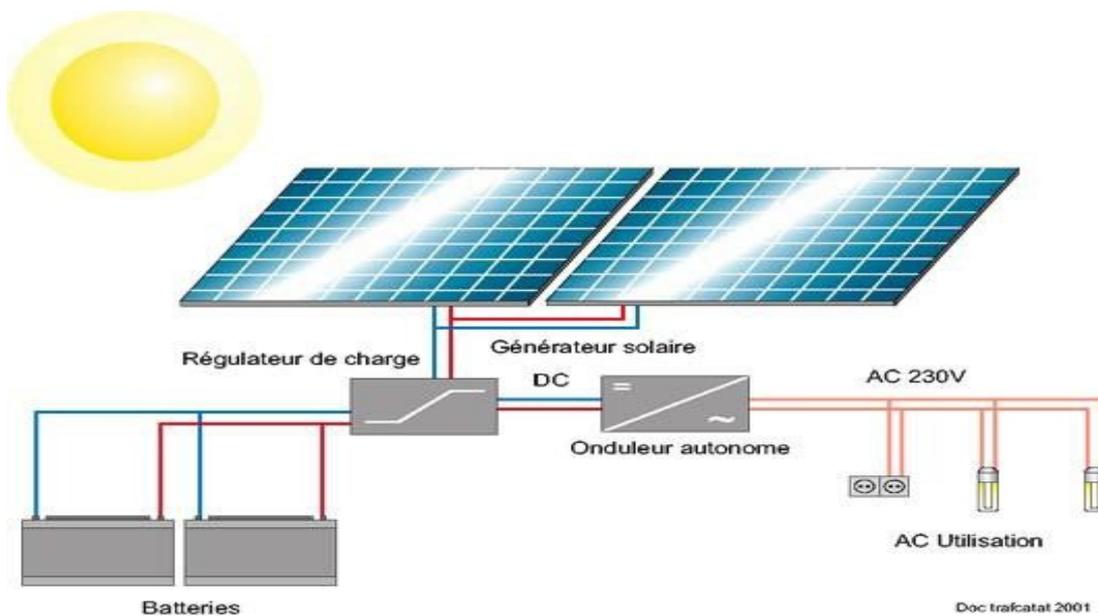


Figure 14. Installation photovoltaïque autonome [19]

b) SYSTEMES COUPLES AU RESEAU

Les systèmes PV connectés au réseau avec le service public sont conçus pour fonctionner en parallèle et s'interconnecter au réseau. Le composant principal d'un système photovoltaïque connecté au réseau est l'onduleur. L'onduleur convertit le courant continu généré par le système photovoltaïque en courant alternatif qui répond aux exigences de tension et de qualité de l'alimentation du réseau, et arrête automatiquement d'alimenter le réseau lorsque le réseau n'est pas sous tension [20].

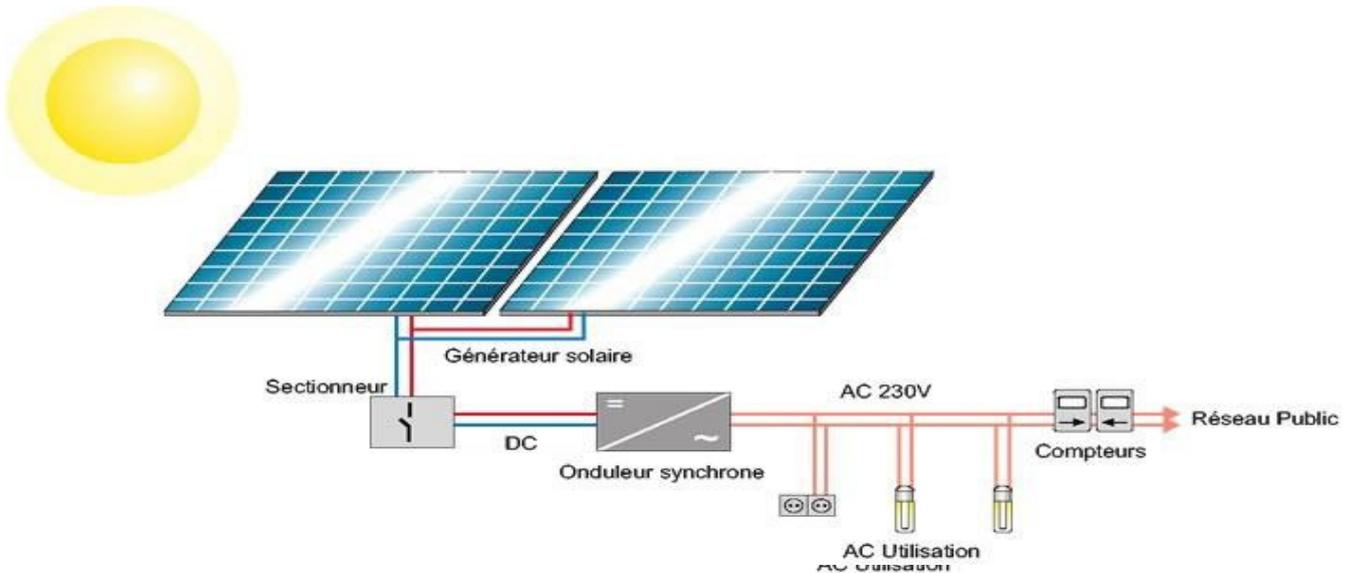


Figure 15 : Installation photovoltaïque couplée au réseau [19]

c) SYSTÈMES HYBRIDES

Les systèmes d'énergie solaire hybride sont des systèmes d'énergie hybride qui combinent l'énergie solaire d'un système photovoltaïque avec une autre source d'énergie génératrice [21]. Les systèmes hybrides solaires comprennent les systèmes éoliens-solaires. La combinaison de l'éolien et du solaire a l'avantage que les deux sources se complètent, car les pics de fonctionnement de chaque système se produisent à des moments différents de la journée et de l'année. La production d'électricité d'un tel système hybride est plus constante et fluctue moins que celle de chacun des deux sous-systèmes composants [20].

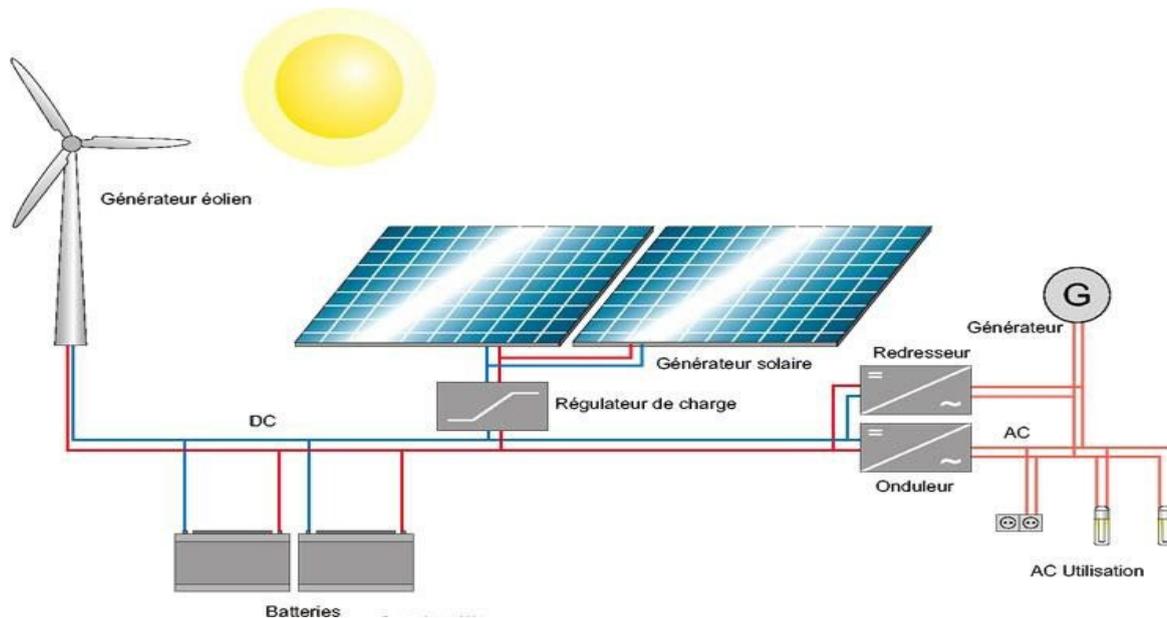


Figure 16: Système hybride [20]

1.3.3 Énergie solaire thermique

1.3.3.1 Introduction

Le flux solaire peut également être converti directement en énergie thermique (chaleur) à l'aide de capteurs solaires. Cette technologie est adaptée au chauffage des habitations et des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire ou au séchage des cultures (aliments pour animaux, céréales et fruits). En d'autres termes, l'énergie solaire posera des problèmes de conversion, plutôt que de chauffage direct [17], [18].

1.3.3.2 Les capteurs solaires thermiques

Le réfrigérant (eau + antigel ou air) est utilisé pour récupérer la chaleur, et le fluide caloporteur est chauffé en circulant dans l'absorbeur sous le verre. Cela permet à la lumière du soleil de pénétrer et de réduire les pertes infrarouges de l'absorbeur en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage limite également les échanges de chaleur avec l'atmosphère (Figure 16).

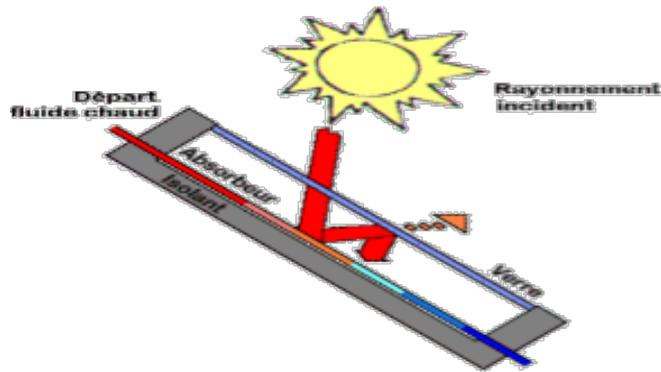


Figure 17: Capteur thermique solaire [18]

1.3.3.3 Processus de conversion thermomécanique

Comme les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, la chaleur peut être transformée en énergie électrique par des processus thermodynamiques. Il existe plusieurs façons de réaliser cette transformation : en utilisant un moteur à piston ou une turbine à gaz.

Le problème de la conversion reste à résoudre, il faut de la chaleur, et la limite supérieure du rendement de conversion de la chaleur solaire en énergie électrique est donnée par le rendement de Carnot [17.18].

Par conséquent, les centrales solaires thermomécaniques nécessitent généralement un approvisionnement en eau : cela peut s'avérer être un facteur limitant dans l'implantation des installations dans les régions arides.

Bref, on peut dire que le rendement du générateur thermomécanique dépend directement de la température de sortie du capteur solaire, et de ce point de vue, la température doit être la plus élevée possible. La température est directement liée au facteur de concentration. Il est connu qu'un générateur à coefficient de concentration élevée aura une surface de captage plus petite qu'un générateur de même puissance avec un coefficient de concentration plus faible.

1.3.3.4 Le solaire thermodynamique

L'expression "énergie solaire thermodynamique" désigne toutes les technologies qui visent à convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique à haute température, puis à convertir cette énergie en énergie mécanique (et en électricité) par le biais d'un cycle thermodynamique.

Dans la plupart des cas, ces technologies sont basées sur la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique à haute température, puis sur la conversion de cette énergie en énergie mécanique (et

en électricité) par le biais d'un cycle thermodynamique. Dans la plupart des cas, ces technologies en sont encore au stade expérimental. Les principaux aspects de ces technologies sont :

a) *LES ASPECTS TECHNIQUES*

Tout dispositif thermodynamique solaire doit remplir la même fonction pour convertir l'énergie du rayonnement incident en énergie électrique avec le plus haut rendement possible.

On les examine ci-après dans l'ordre suivant :

- La concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur,
- Son absorption sur les parois du récepteur et la conversion de son énergie en chaleur,
- Le transport et, éventuellement, le stockage de cette chaleur,
- L'envoyer au cycle thermodynamique associé à un alternateur pour la production d'électricité.

b) *LA CONCENTRATION*

En principe, il suffit de convertir le rayonnement solaire en chaleur. Pour travailler à des températures élevées et assurer un cyclage thermodynamique efficace, la surface des réceptions doivent être fortement réduites afin de maintenir ces pertes proportionnelles à un niveau raisonnable.

C'est ce que l'on fait en disposant devant le récepteur une optique qui concentre sur celui-ci le rayonnement capté sur une surface bien supérieure. On caractérise la performance du système par le chiffre de sa 'concentration' qui est le rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur.

Dans la pratique cette optique est systématiquement constituée de miroirs.

c) *LA RECEPTION DU RAYONNEMENT*

Maintenant il faut absorber concentrer sur la surface noire (ou le volume semi-transparent, dont l'épaisseur est noire), absorbe donc le spectre visible (et donc absorbe de l'énergie très proche de son spectre solaire) et transfère la chaleur résultante au fluide caloporteur.

d) *LA TRANSFORMATION THERMOELECTRIQUE DE L'ENERGIE RECOLTEE*

Cette conversion se fait généralement de manière tout à fait traditionnelle à l'aide d'une turbine à vapeur reliée à un alternateur.

1.3.3.5 Conclusion

Tout d'abord, il convient de noter que pour chaque unité d'énergie produite par une centrale solaire, un grand miroir doit être déployé, les ressources elles-mêmes étant très dispersées. C'est la principale raison du coût initial élevé de la technologie à mettre en œuvre.

Pour en tirer parti, il est nécessaire de rechercher avec une grande détermination une efficacité maximale dans tous les éléments de la chaîne de traitement et de trouver une solution rentable pour le déploiement de miroirs de grande surface.

Pour en tirer parti, il est nécessaire de poursuivre avec détermination une efficacité maximale dans tous les éléments de la chaîne de traitement et de trouver une solution rentable pour le développement des miroirs de grande surface.

1.3.4 Conclusion générale

Le photovoltaïque diffère de l'énergie solaire thermique. L'énergie solaire thermique ne produit pas d'électricité, mais convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'énergie solaire thermique est principalement utilisée dans deux applications : la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Sa production est rentable. Elle est abordable sur le marché mondial, mais elle nécessite une masse d'eau à proximité.

1.4 ÉNERGIE DE LA BIOMASSE

1.4.1 Introduction

La biomasse comprend des matières premières organiques d'origines végétales diverses : recyclage de certaines cultures, déchets agricoles, industriels ou domestiques. C'est une énergie stockable et non volatile, mais elle présente de nombreux avantages.

L'utilisation de la biomasse a un effet neutre sur la menace du réchauffement climatique : les plantes cultivées à des fins énergétiques restituent le carbone stocké pendant leur croissance.

La conversion énergétique de la biomasse peut donner trois produits principaux, selon le type de biomasse et la technologie utilisée. Les trois produits énergétiques utiles issus de la biomasse sont la chaleur, l'électricité (ou une combinaison des deux dans le cas de la production combinée de chaleur et d'électricité) et le transport (biocarburant). Ces produits ont des propriétés physiques très différentes : solides (paille, copeaux de bois, bûches), liquides (huiles végétales, bioéthanol), gazeux (biogaz).

1.4.2 Procédés de conversion de la biomasse en énergie

La voie utilisée pour la production d'énergie est une voie sèche utilisant de la biomasse solide. Il est principalement composé du département thermochimique, qui regroupe les technologies de combustion, de gazéification et de pyrolyse [22].

1.4.2.1 La combustion

Il s'agit de l'oxydation complète du carburant, généralement en présence d'un excès d'air, et génère de la chaleur. Il existe de nombreuses technologies pour brûler de la biomasse solide, principalement le bois.

Dans le cas d'une chaudière, la chaleur est transférée au fluide caloporteur, généralement de l'eau. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenue est utilisée dans des procédés industriels ou des réseaux de chauffage urbain.

La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou une machine à vapeur pour générer de l'énergie mécanique, notamment de l'électricité.

1.4.2.2 La gazéification

La biomasse solide est aussi une décomposition thermique de la matière, mais en atmosphère réductrice (la quantité d'air est réduite). Cette gazéification est réalisée dans un réacteur spécial.

Le résultat est que la matière solide, à l'exception des cendres, est complètement convertie en gaz combustible. Après avoir été purifié et filtré, ce gaz est brûlé dans un moteur à combustion interne pour produire de l'énergie mécanique ou de l'électricité.

1.4.2.3 La pyrolyse

Il s'agit de la décomposition thermique des matières carbonées sous vide ou atmosphère inerte (pas d'air ou air fortement réduit). Elle conduit à la production de solides, charbon de bois ou charbon végétal, de liquides, d'huile de pyrolyse et de gaz combustibles. La pyrolyse peut maximiser la production de charbon de bois ou d'huile de pyrolyse.

Certaines techniques du domaine de la thermochimie (combustion, pyrolyse) peuvent également traiter la biomasse humide. Mais cela se fait au détriment de l'efficacité énergétique. Pour ces biomasses humides - déchets organiques verts très humides, ordures ménagères, eaux usées d'élevage, agro-

industrie - il pourrait être plus intéressant de les mouiller. La principale filière de cette filière est le biogaz, qui produit du gaz riche en méthane et à haut pouvoir calorifique. Ce type de biogaz est brûlé dans des chaudières pour produire de la chaleur ou dans des moteurs à combustion interne pour produire de l'électricité ; il peut également être combiné avec la cogénération (cogénération) d'usines de biogaz.

1.4.3 Conclusion

Les gaz de combustion sont utilisés dans les chaudières pour produire de la chaleur ou de l'énergie mécanique par le biais de turbines à vapeur, avec ou sans cogénération. La production de chaleur est actuellement la principale forme de valorisation énergétique de la biomasse dans le monde. Le niveau de puissance que l'on peut atteindre avec la technologie de combustion dépend du procédé. Ainsi, la puissance des locomotives à vapeur va de 100 à 600 kW et celle des turbines à vapeur de quelques centaines de kW à des dizaines de MW, ce qui fait de ces options technologiques un véritable outil de développement rural et d'électrification. Cependant, leur recyclage peut poser des problèmes logistiques lorsque de grandes quantités de matières premières sont nécessaires pour obtenir une énergie suffisante et rentable. Actuellement, les coûts énergétiques de nombreuses applications sont encore trop élevés.

1.5 CONCLUSION GENERALE

Les énergies renouvelables présentent un intérêt particulier : elles peuvent fournir aux populations isolées une électricité bon marché et respectueuse de l'environnement, lorsqu'il n'existe aucun moyen de se connecter au réseau national. Elles peuvent toutefois utiliser les technologies mises au point pour exploiter les sources naturelles d'électricité et de chaleur. Avec 3 milliards de personnes privées d'électricité, les énergies renouvelables peuvent certainement jouer un rôle clé en contribuant au développement économique des régions pauvres.

L'énergie lumineuse du soleil peut être utilisée pour chauffer des piscines, des maisons et des usines, chauffer des pièces, produire de l'électricité, distiller de l'eau et cuire des aliments.

L'énergie solaire stockée dans la matière organique peut être utilisée de nombreuses façons. Le bois et la tourbe produisent de la chaleur lorsqu'ils sont brûlés, et le blé produit de l'éthanol lorsqu'il est fermenté.

CHAPITRE 2

LES CONTRAINTES TECHNIQUES ET FINANCIERES POUR LES DIFFERENTES ENERGIES RENOUVELABLES

2.1 LES CONTRAINTES DE L'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne offre de nombreux avantages, ce qui explique pourquoi elle est la source d'énergie qui connaît la plus forte croissance dans le monde. Les efforts de recherche visent à relever les défis pour accroître l'utilisation de l'énergie éolienne.

2.1.1 Avantages

Les systèmes d'énergie éolienne sont alimentés en énergie par le vent qui circule naturellement, peuvent être considérés comme une source d'énergie propre. L'énergie éolienne ne pollue pas l'air comme les centrales électriques qui utilisent des combustibles fossiles, tels que le charbon ou le gaz naturel. Les éoliennes ne produisent pas d'émissions atmosphériques à l'origine des pluies acides ou des gaz à effet de serre. L'énergie éolienne est disponible en tant que source d'énergie domestique dans le monde entier et n'est pas limitée à quelques pays seulement, comme c'est le cas pour le pétrole et que l'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation.

Les éoliennes peuvent également être construites sur des fermes ou des ranchs, ce qui profite à l'économie dans les zones rurales, où se trouvent la plupart des meilleurs sites éoliens. Les agriculteurs et les éleveurs peuvent continuer à utiliser leurs terres, car les éoliennes n'utilisent qu'une petite fraction du terrain [23].

2.1.2 Inconvénients

L'énergie éolienne doit concurrencer les ressources traditionnelles de production d'électricité sur la base du coût de production. Selon les conditions de vent sur le site, le parc éolien peut ou non être plus compétitif que les centrales à combustibles fossiles, bien que le coût de l'énergie éolienne ait baissé. Au cours des 10 dernières années, cette technologie nécessite un investissement initial plus élevé que les centrales électriques à combustibles fossiles.

Le défi majeur de l'utilisation du vent comme source d'énergie est que le vent est intermittent et qu'il ne souffle pas toujours selon les besoins en électricité. L'énergie éolienne ne peut pas être stockée et tous les vents ne peuvent pas être exploités pour répondre à la demande d'électricité.

Le choix de stocker l'énergie dans des batteries dépasse la faisabilité économique des grandes éoliennes. Bien que les centrales éoliennes aient un impact relativement faible sur l'environnement par rapport à d'autres centrales électriques conventionnelles, le bruit produit par les pales du rotor et les impacts esthétiques (visuels) sont mal perçus par la population. La plupart de ces problèmes ont été résolus ou considérablement réduits grâce au développement technologique ou en plaçant correctement les centrales éoliennes [23].

2.1.3 Progression de l'énergie éolienne au Canada

Le Canada possède un large territoire riche en ressources éoliennes et le potentiel de développement de l'énergie éolienne est gigantesque. Les zones les plus favorables sont les zones offshore et côtières. Les parcs éoliens en mer n'ont pas encore été construits au Canada et le développement des parcs éoliens terrestres a été limité par le fait qu'une grande partie du côté canadien est située dans des régions éloignées, loin du réseau existant. Il existe également des zones très favorables à travers le Canada, notamment dans le sud des prairies et le long du golfe du Saint-Laurent.

La capacité de production d'énergie éolienne au Canada a augmenté rapidement au cours des dernières années et devrait continuer à le faire. Cette croissance rapide est due aux initiatives gouvernementales et à l'intérêt croissant des producteurs d'énergie. En 2019, le Canada comptait plus de 6771 éoliennes réparties dans 301 parcs éoliens, pour une puissance installée de 13413 mégawatts, contre seulement 60 éoliennes, huit parcs éoliens et 27 mégawatts en 1998. Les provinces où la génération d'énergie éolienne est la plus élevée sont l'Ontario, le Québec et l'Alberta [24].

Puissance éolienne terrestre installée au Canada (MW)

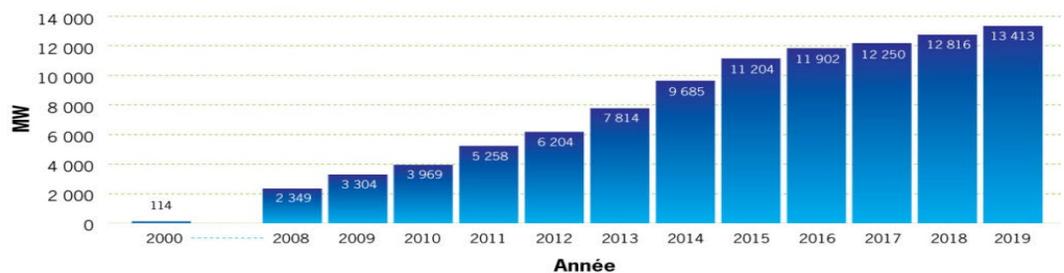


Figure 18 Accumulation de la puissance éolienne terrestre installée au Canada [24]

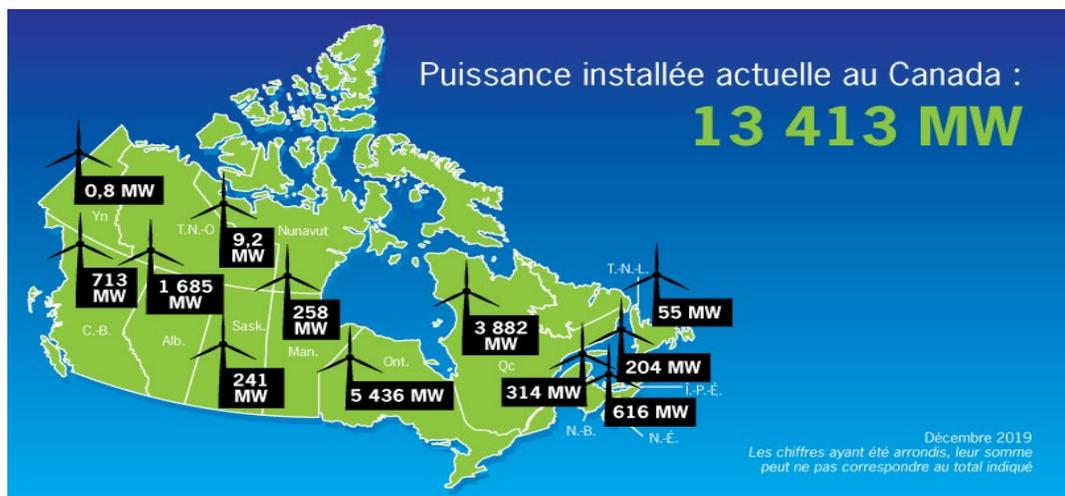


Figure 19. Distribution de la puissance éolienne pour chaque province au Canada [24]

2.2 LES CONTRAINTES POUR ENERGIES PHOTOVOLTAÏQUES

2.2.1 Avantages

Le soleil est la seule ressource nécessaire aux panneaux solaires. Et le soleil brillera jusqu'au dernier moment. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de silicium, un matériau abondant et non toxique (le deuxième matériau le plus abondant sur Terre).

La génération d'électricité solaire utilise uniquement l'énergie solaire comme combustible - elle ne crée aucun sous-produit nocif et contribue activement à la réduction du réchauffement climatique.

Les performances des cellules photovoltaïques sont généralement garanties par les fabricants pendant 20 à 25 ans. Par conséquent, à long terme, le photovoltaïque est une technologie fiable. En outre, les consommateurs garantissent la fiabilité du produit (Figure 19).

Les modules PV sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Elle permet également de réduire l'énergie nécessaire à la production de ces matériaux et donc de réduire leurs coûts de fabrication.

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucun entretien et sont faciles à intégrer. Les systèmes photovoltaïques offrent une valeur ajoutée aux zones rurales (notamment dans les pays en développement où il n'existe pas de réseau électrique).

Les modules solaires peuvent revêtir les toits et les murs extérieurs, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés dans un édifice de très haute qualité esthétique.

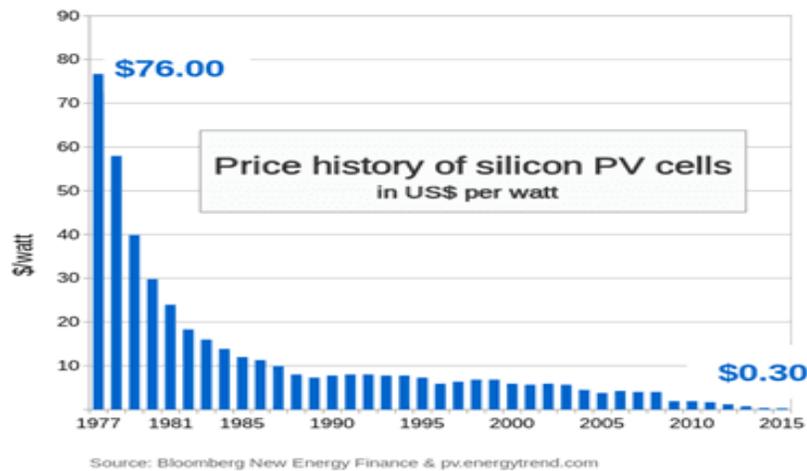


Figure 20 Évolution du prix des cellules photovoltaïques [25]

2.2.2 Inconvénients

Le progrès du photovoltaïque est rapide, mais il occupe encore un peu de place dans le bilan énergétique mondial. L'ensemble des modules existant à ce jour produit autant d'énergie que 20% d'une unité nucléaire. En particulier, il ne constitue pas une solution valable pour répondre immédiatement aux défis nationaux actuels [25].

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule de silicium cristallin est de 28%).

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles puissances.

Les générateurs diesel ne sont adaptés qu'aux faibles demandes d'énergie dans les régions éloignées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est augmenté, mais la fiabilité et les performances du système sont équivalentes, à condition que la batterie et les composants de contrôle associés soient soigneusement sélectionnés [25].

2.2.3 Le potentiel photovoltaïque canadien

La figure suivante présente le potentiel photovoltaïque canadien. Les valeurs sont comprises entre 850 et 1400 kWh/kW/an, la valeur moyenne étant de 1131 kWh/kW/an. Suivant la même logique que dans la figure précédente, plus la couleur tend vers le rouge, meilleur est le potentiel photovoltaïque. Par exemple, les provinces des prairies canadiennes ont le potentiel le plus important, toujours en raison d'une couverture nuageuse moins importante que dans les autres zones au Canada (Figure 20) [26].

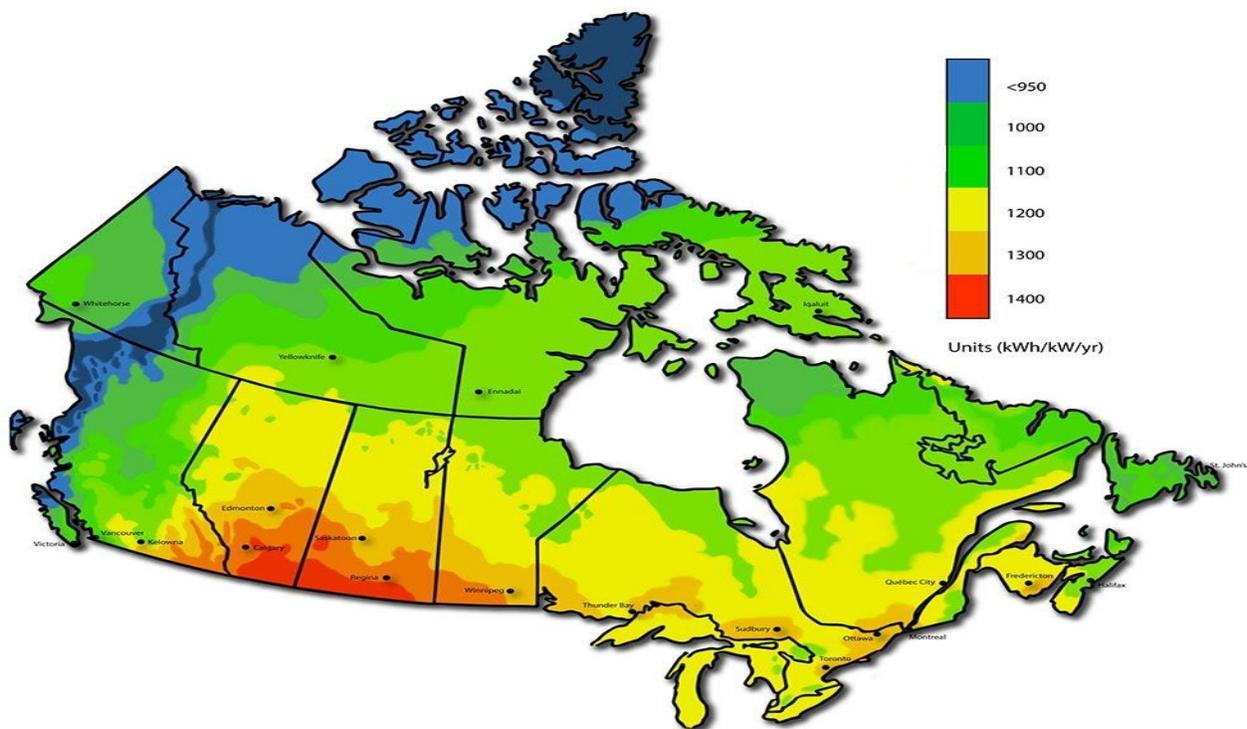


Figure 21 Le potentiel photovoltaïque canadien [26]

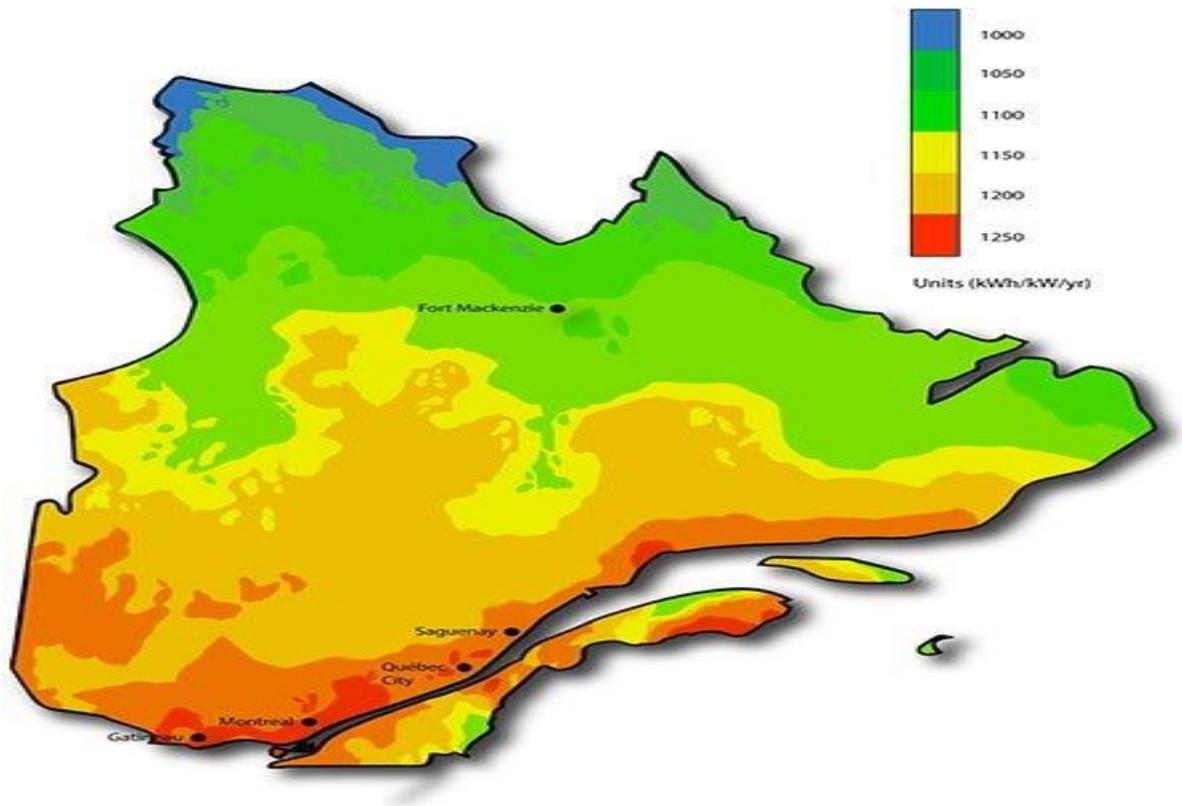


Figure 22 Le potentiel photovoltaïque québécois [26]

2.2.4 Progression de l'énergie solaire au Canada

La plus grande partie de la capacité canadienne en énergie solaire provient de l'Ontario, en raison des mesures incitatives offertes par la province. En 2018, la capacité de l'industrie de l'énergie solaire photovoltaïque représentait 3 040 MW.

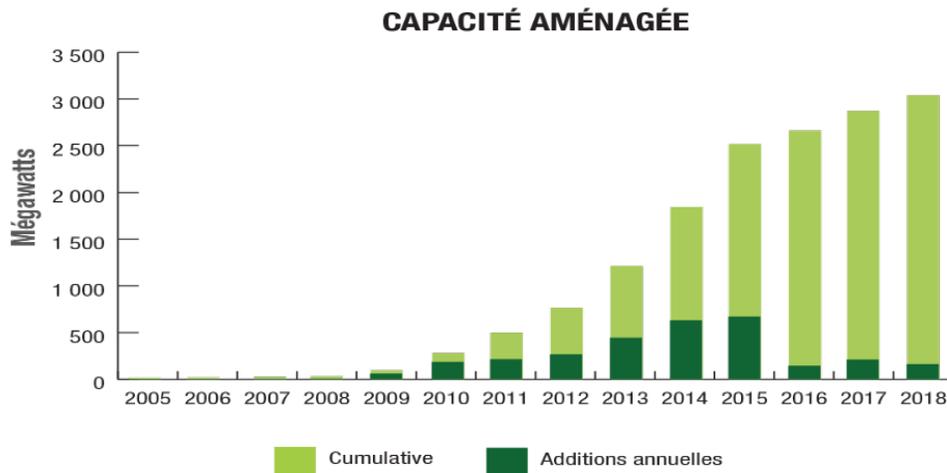


Figure 23 La capacité aménagée de l'énergie solaire [27]

2.3 LES CONTRAINTES POUR L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

2.3.1 Avantages

L'énergie solaire est une énergie renouvelable qui comporte des avantages :

- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommée pour sa fabrication.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles [28].

2.3.2 Inconvénients

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil

- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes [28].

2.4 LES CONTRAINTES POUR L'ÉNERGIE DE LA BIOMASSE

2.4.1 Avantages

- Les énergies issues de la biomasse permettent de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de soutenir un mix énergétique performant pour le Canada ;
- la biomasse permet aux secteurs de production (industrie du bois, agriculture) de se diversifier et de renforcer leurs revenus ;
- Ce sont des facteurs de déploiement de l'économie circulaire ;
- La bioénergie issue de la biomasse permet aux individus de réduire leur facture énergétique et de diminuer la rupture énergétique ;
- La biomasse est une ressource naturelle disponible en abondance. Le bois, qui représente une part essentielle de la biomasse-énergie, est utilisé à 60 % de sa capacité.

2.4.2 Inconvénients

- La biomasse n'est envisagée comme une énergie renouvelable que si son utilisation des ressources se fait de manière structurée et sans menacer le renouvellement naturel. Exemple : l'utilisation du bois, même s'il y a beaucoup de forêts et de zones boisées au Canada, doit se faire sans menacer le renouvellement. Il est donc essentiel de diversifier les ressources de biomasse utilisées pour produire de l'énergie (bois + déchets végétaux, etc.).
- La biomasse génère des émissions de CO₂, mais dans une bien moindre mesure que les énergies fossiles. Ces émissions de CO₂ sont compensées par la quantité de dioxyde de carbone absorbée par les plantes au cours de leur cycle de vie. De plus, la combustion de la biomasse produit en particulier une part importante de particules fines, responsables de problèmes de santé importants (problèmes respiratoires chez les personnes physiques comme l'asthme).

- Un autre obstacle à son exploitation est son coût de production assez élevé. L'exploitation d'une centrale à biomasse implique des procédés de production (combustion et méthanisation) qui ont un impact sur le prix de l'énergie, dont le tarif de l'électricité.

2.4.3 Progression de l'énergie de la biomasse au Canada

En 2014, on a enregistré environ 70 centrales électriques à la biomasse au Canada, pour une puissance installée globale de 2408 MW. La plupart de ces centrales sont alimentées par du bois, des sous-produits du bois et des gaz d'enfouissement [30].

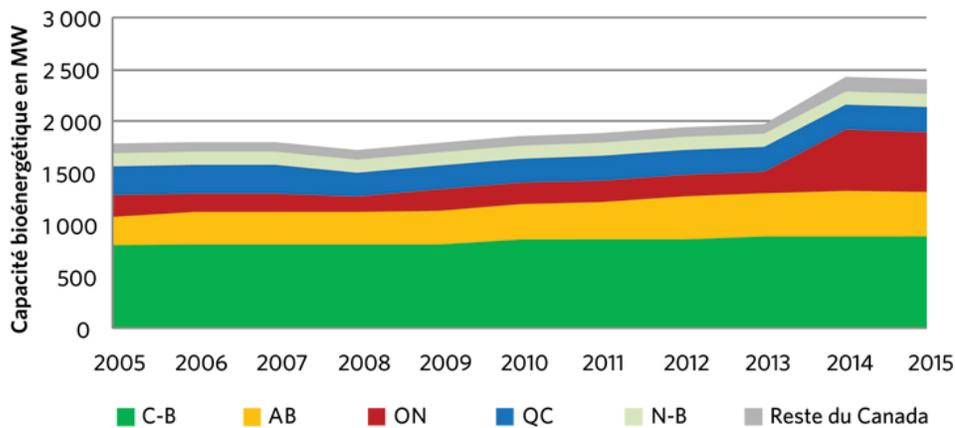


Figure 24 La capacité aménagée de l'énergie de la biomasse [30]

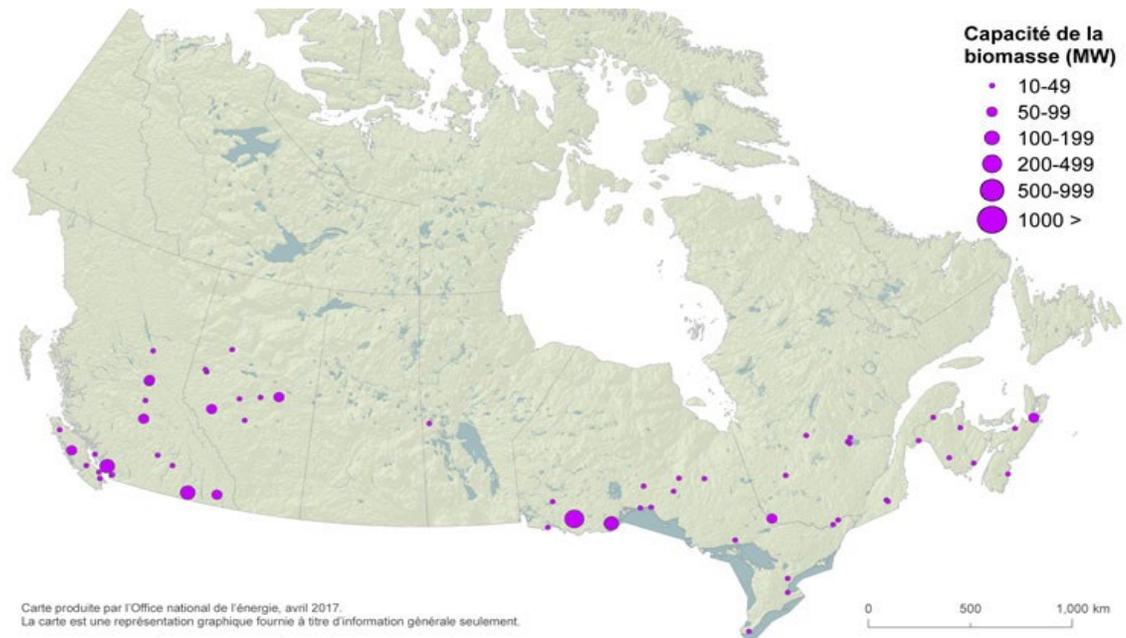


Figure 25 Emplacement des centrales alimentées à la biomasse au Canada [30]

La carte présente l'emplacement et la puissance approximative des centrales électriques à biomasse canadiennes d'au moins 10 MW. La plupart de ces installations sont situées en Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario, au Québec, au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse [30].

2.5 LE POTENTIEL D'EXPANSION POUR L'ENERGIE RENOUVELABLE

La production d'énergie renouvelable non hydraulique a plus que doublé au cours de la période de prévision ; de près de 16 GW en 2015 à 33 GW en 2040, comme le montre la Figure 25. Depuis lors, la mise à jour de 2016 prévoyait une croissance encore plus rapide de la capacité de ces ressources jusqu'en 2040, soit une augmentation de 16 % par rapport au 2016. Les principaux facteurs expliquant cette situation sont l'adoption de nouvelles politiques annoncées et le développement de nouvelles installations.

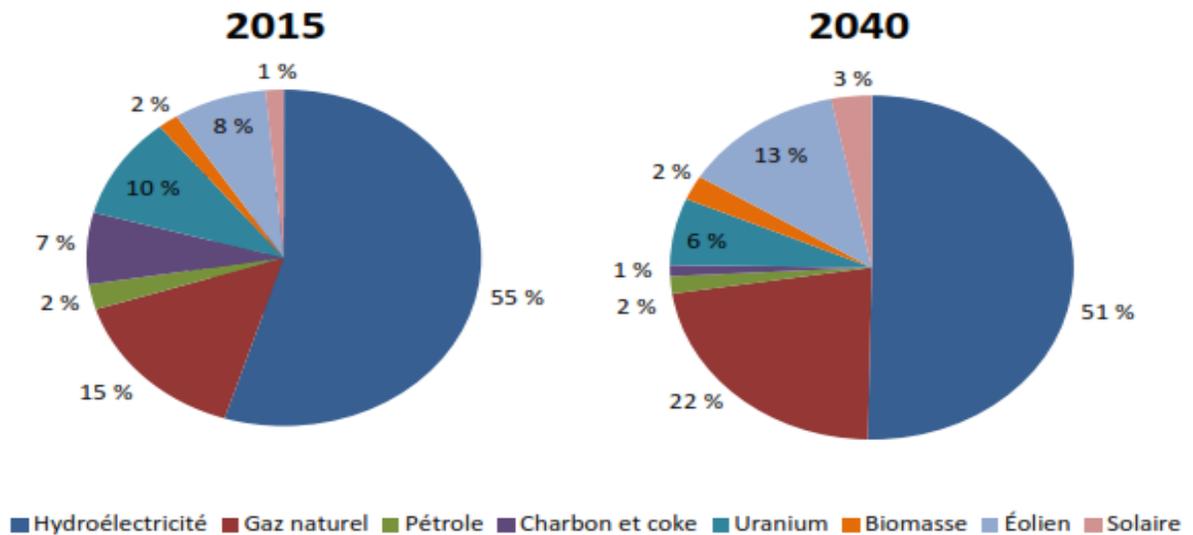


Figure 26 Composition de l'énergie selon les combustibles primaires en 2015 et 2040 [30]

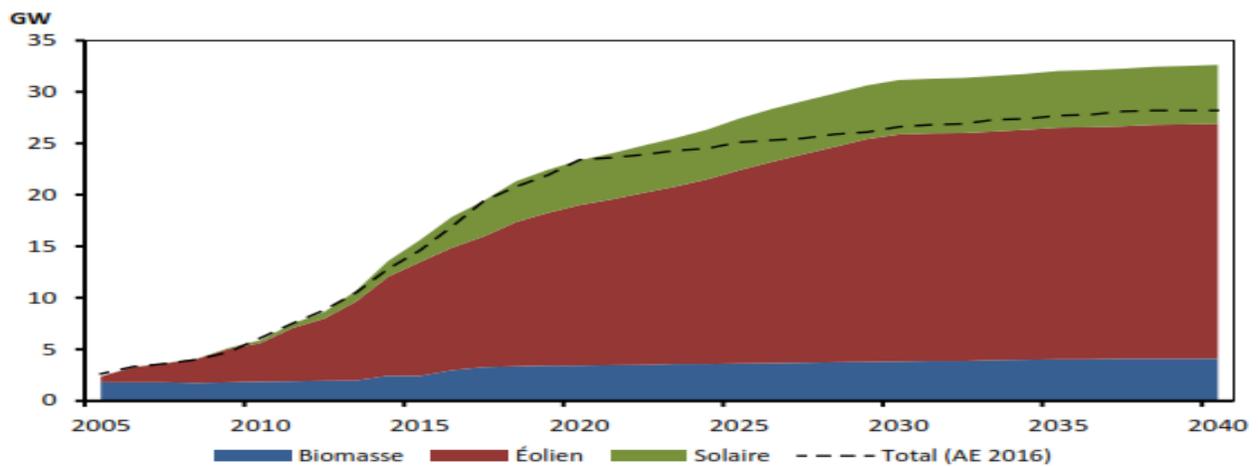


Figure 27 Capacité de production des ressources renouvelables [31]

La production totale d'électricité au Canada augmente à un taux de 0,6 % par année, passant de 653 TWh en 2015 à 755 TWh en 2040. La figure 26 montre la génération de carburant. La production totale est en baisse de 5 % d'ici 2040 par rapport aux prévisions du rapport AE 2016, en raison d'une croissance plus lente de la demande d'électricité. La

production d'électricité à partir du charbon, de l'hydroélectricité et du gaz naturel est en déclin, tandis que l'éolien et le solaire sont en sens inverse.

Bien qu'il ne représente que 7 % de la production totale d'électricité, le charbon représentait 63 % des émissions de gaz à effet de serre liées à l'électricité en 2018. Les émissions totales d'électricité ont diminué de 46 % entre 2000 et 2018 en raison de l'augmentation de la production à partir de sources non émettrices.

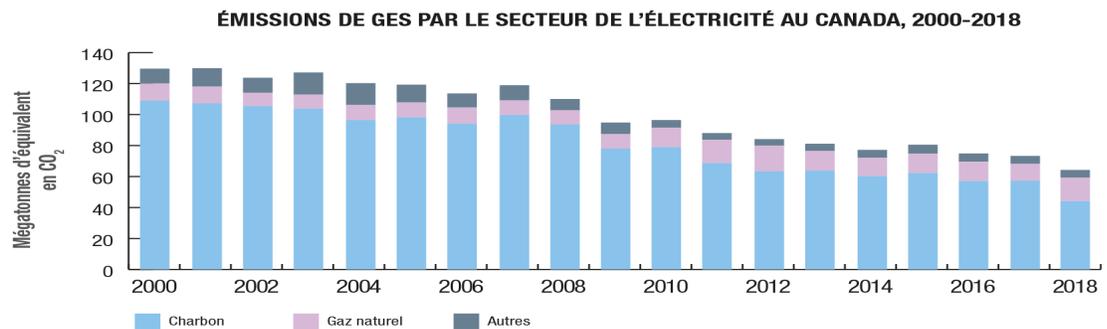


Figure 28 La quantité d'émissions de gaz à effet de serre (GES) découlant de la production d'électricité [31]

En 2018, les sources de gaz autres que les gaz à effet de serre ont généré 82 % de l'électricité au Canada. Parmi eux, l'hydroélectricité représentait 60 %, l'énergie nucléaire 15 % et les autres énergies renouvelables 7 %.

La production nette d'électricité éolienne totalisait 1552 GWh en 2005, pour augmenter à 32 855 GWh en 2018. La production nette d'électricité solaire totalisait 17 GWh en 2005, pour augmenter et atteindre 3 796 GWh en 2018 [31].

Les sources d'énergie renouvelable comptent pour deux tiers de la production totale d'électricité au Canada.

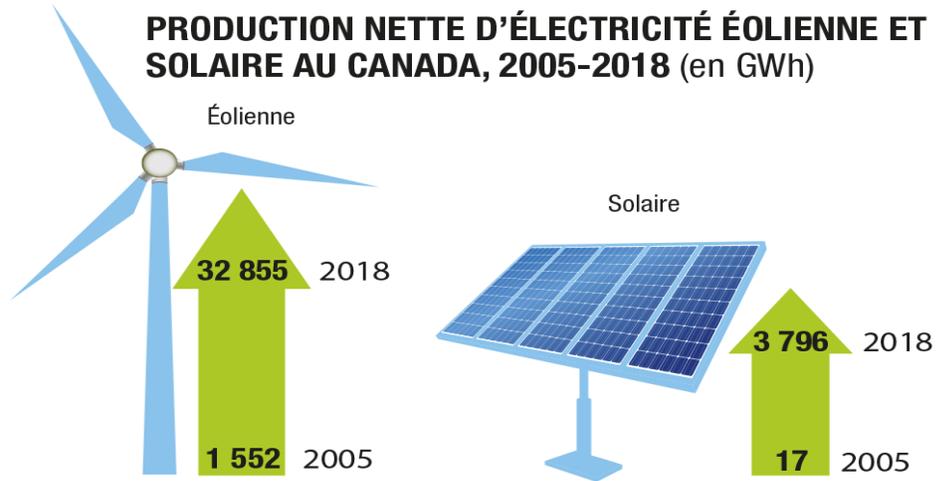


Figure 29 Production nette d'électricité éolienne et solaire au Canada 2005-2018 (en GWh) [31]

2.6 COUT MARGINAL DE L'ÉNERGIE RENOUVELABLE

La dernière mise à jour annuelle de l'analyse des coûts énergétiques de Lazard (LCOE 13.0) montre qu'à mesure que le coût des énergies renouvelables continue de baisser, certaines technologies (pour les nouvelles bases) continuent de maintenir une compétitivité de coût marginal par rapport aux technologies de production traditionnelles existantes [32].

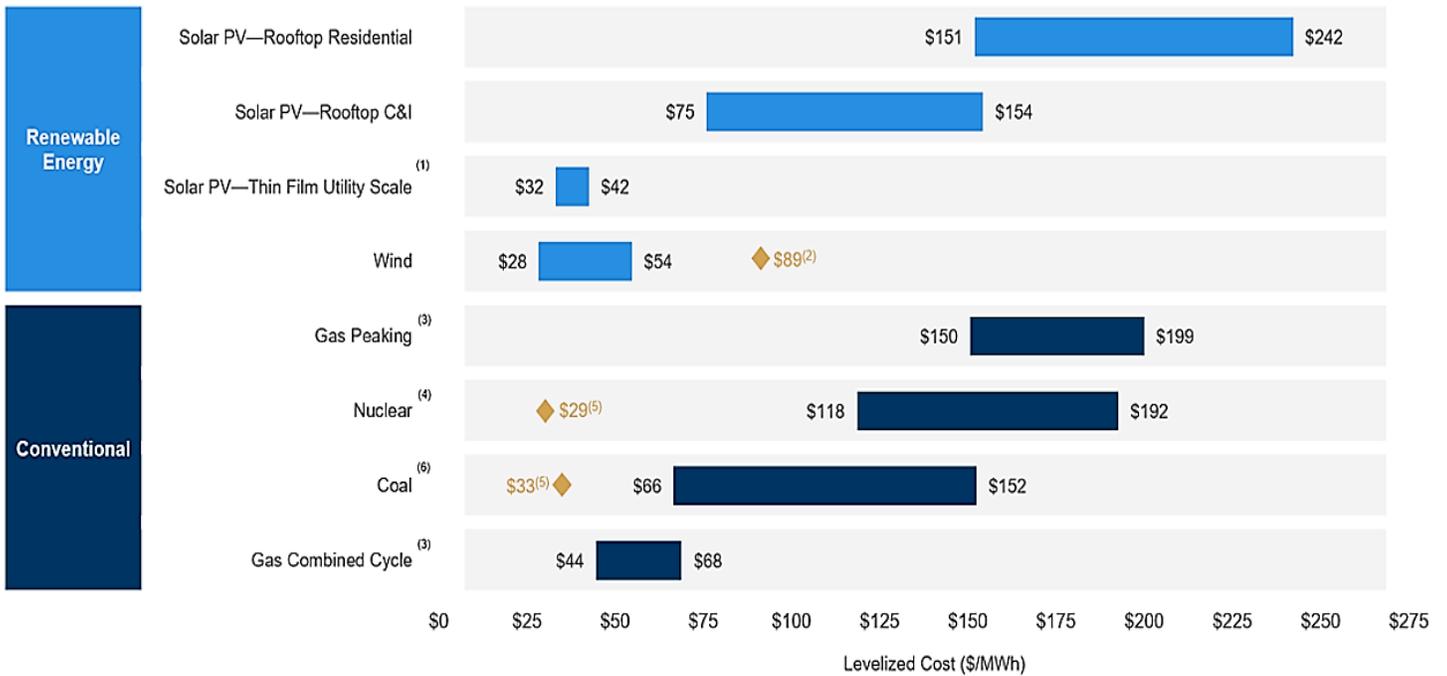


Figure 30 Le cout des technologies de production d'énergie renouvelable par rapport aux technologies de production conventionnelles dans certaines circonstances [32]

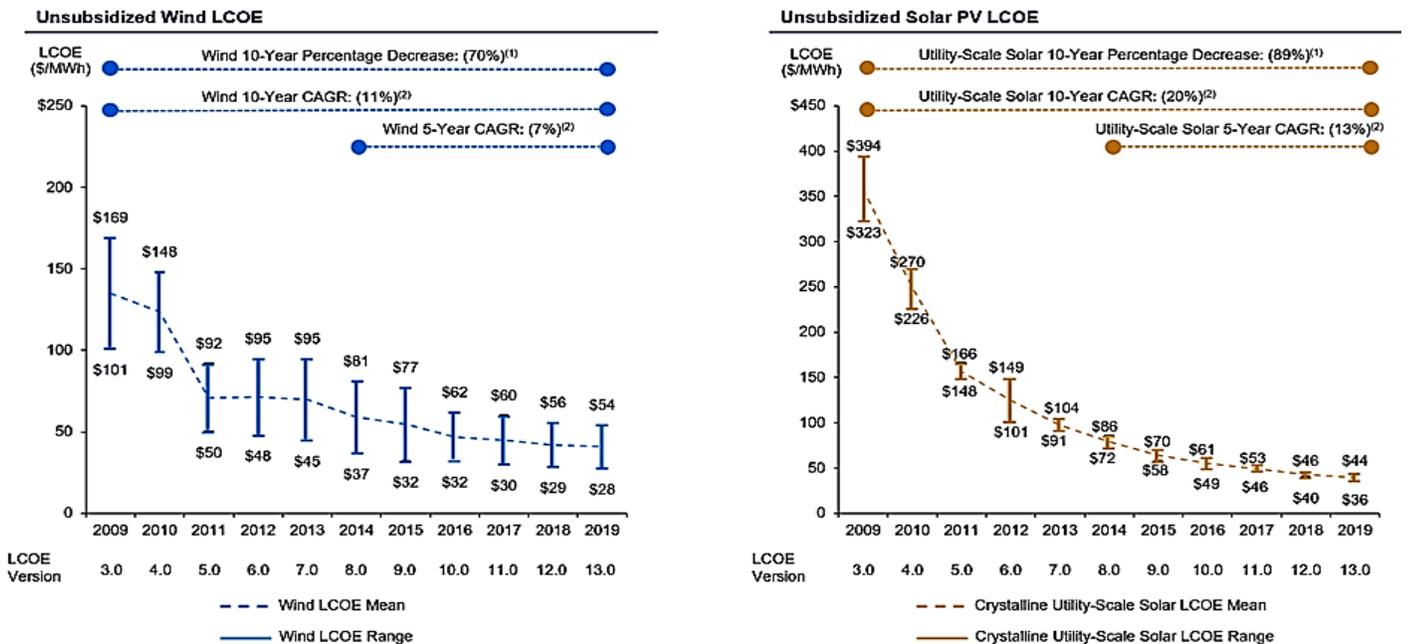


Figure 31 Le coût actualisé de l'énergie éolienne et de photovoltaïque [32]

Alors que les coûts continuent de baisser, le taux de déclin a ralenti, en particulier pour l'éolien terrestre. Au cours des cinq dernières années, le coût du solaire à grande échelle a chuté plus rapidement (environ 13 % par an) que celui de l'éolien terrestre (environ 7 % par an).

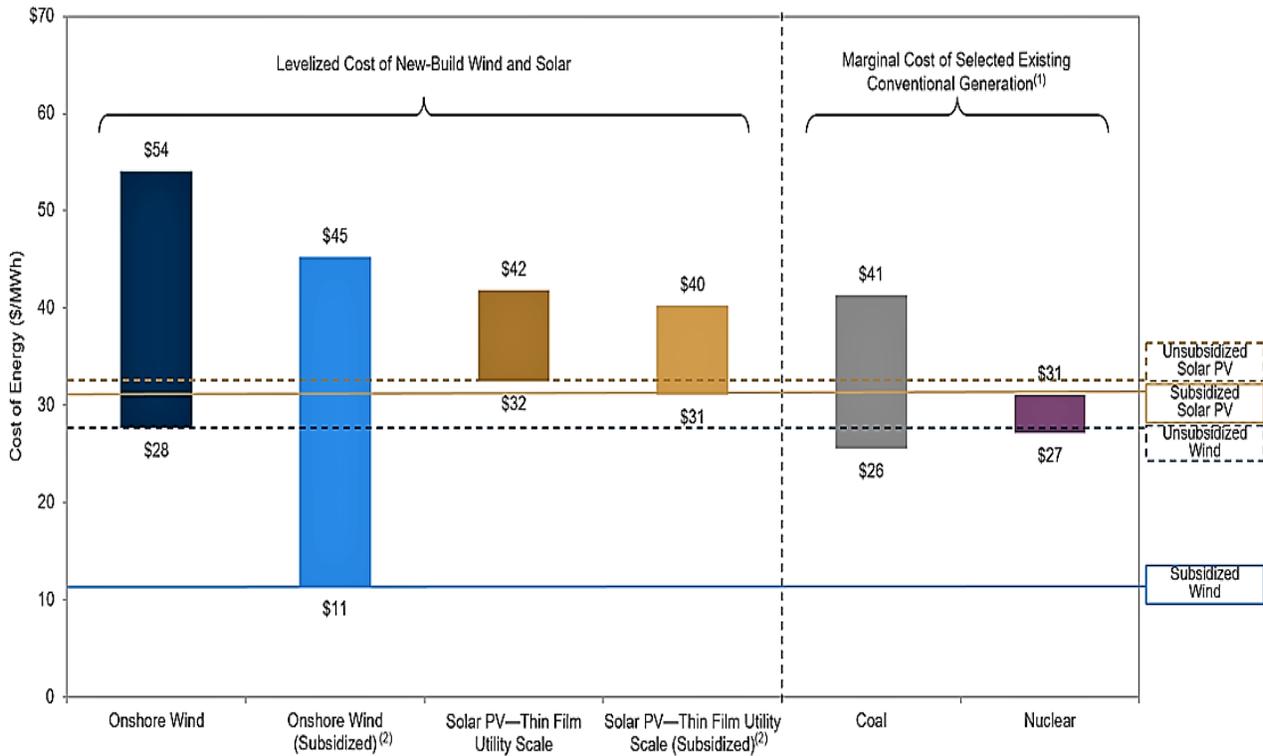


Figure 32 Le coût d'investissement pour production énergie renouvelable par rapport de la production conventionnelle [32]

Le coût des nouveaux éoliens terrestres et solaires à grande échelle (28 \$/MWh en moyenne et 36 \$/MWh en moyenne, respectivement) est compétitif par rapport au coût marginal de la production d'électricité au charbon et nucléaire (34 \$/MWh en moyenne).

2.7 COUT MARGINAL DU STOCKAGE

Le solaire photovoltaïque et l'éolien sont devenus de plus en plus compétitifs par rapport aux technologies conventionnelles avec des profils de production similaires sans

stockage, mais ces ressources n'ont pas les caractéristiques de répartition et les avantages associés de ces technologies conventionnelles

Lazard's LCOS analysis evaluates storage systems on a levelized basis to derive cost metrics based on annual energy output

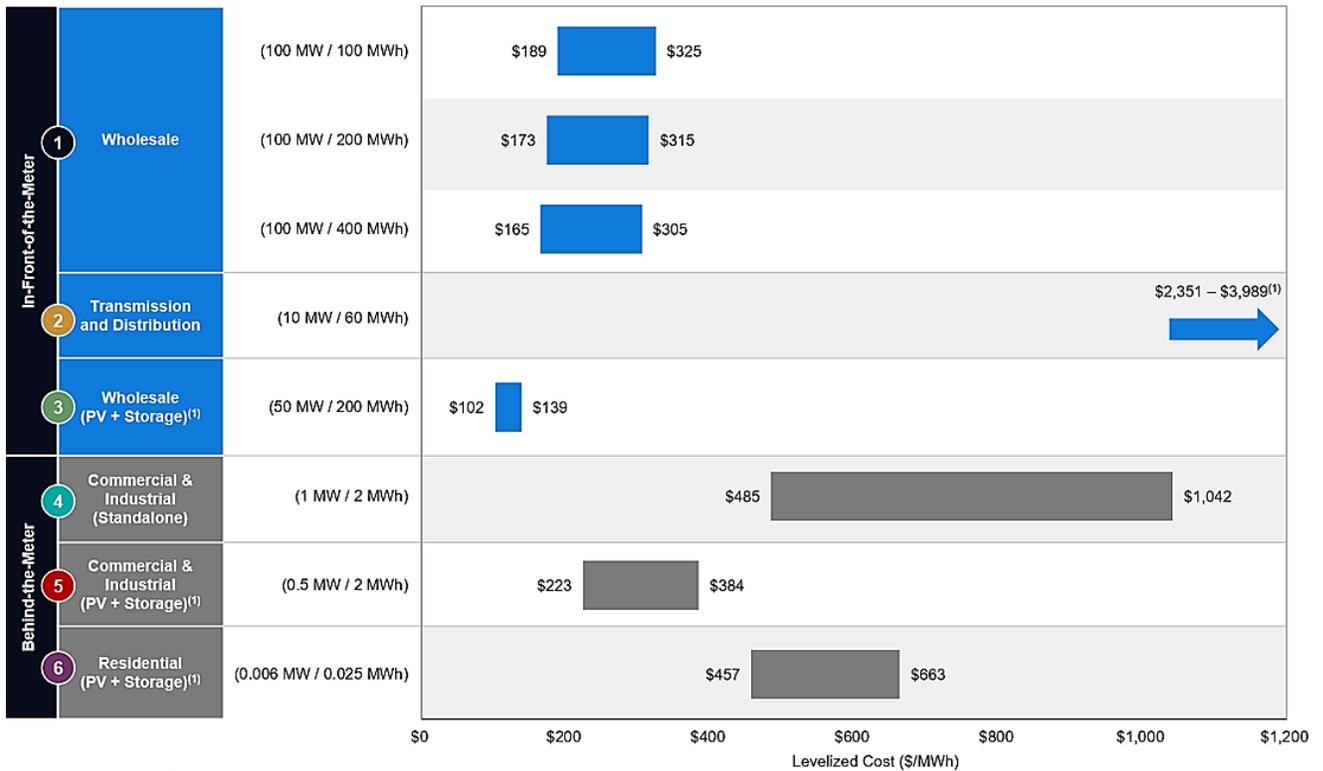


Figure 33 Coût marginal du stockage non subventionné [26]

Le lithium-ion, en particulier pour les applications à court terme, reste la moins chère des technologies de stockage d'énergie analysées, et ses coûts continuent de baisser en raison de l'amélioration de l'efficacité des chaînes de production et de la maturité des approvisionnements.

Les systèmes de stockage solaire PV + sont économiquement attractifs pour les cas d'utilisation commerciale de gros et à court terme, bien qu'ils posent toujours des défis pour les cas d'utilisation résidentielle à grande échelle et à long terme [26].

CHAPITRE 3 L'OPTIMISATION DE LA CONVERSION ET DE L'INTEGRATION DE PLUSIEURS ENERGIES RENOUVELABLES

3.1 ETUDE DU COMPORTEMENT INTELLIGENT D'UN CONTROLEUR FLOU DE SUIVI D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE MAXIMALE

3.1.1 Introduction

Le développement ultérieur doit améliorer l'efficacité de la conversion et réduire les coûts des composants. L'énergie électrique extraite par les générateurs photovoltaïques dépend d'une équation complexe liée au rayonnement solaire, à la température et à la résistance totale du circuit, ce qui se traduit par une variation non linéaire de la puissance de sortie P en fonction de la tension du circuit V sous forme de $P = f(V)$. Dans des conditions d'irradiation et de température données, il existe un point où le générateur produit la puissance maximale, appelé MPP (Maximum Power Point). Ce MPP est atteint lorsque le taux de variation de puissance en fonction de la tension est nul. La relation non linéaire entre la puissance de sortie des générateurs photovoltaïques et les conditions environnementales rend l'efficacité de conversion des générateurs solaires relativement faible, de sorte que l'optimisation de l'extraction d'énergie est devenue un problème clé pour la conversion des générateurs solaires. Le développement de la méthode d'analyse mathématique floue couplée en tant que technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour augmenter la puissance extraite par le générateur PV [33].

3.1.2 But de l'exploitation de l'énergie maximale du système photovoltaïque

Lorsque nous considérons la puissance de sortie photovoltaïque et la tension d'un générateur solaire spécifique sous différents niveaux d'irradiation et de température, nous remarquons qu'il existe un point où la puissance maximale peut être restaurée.

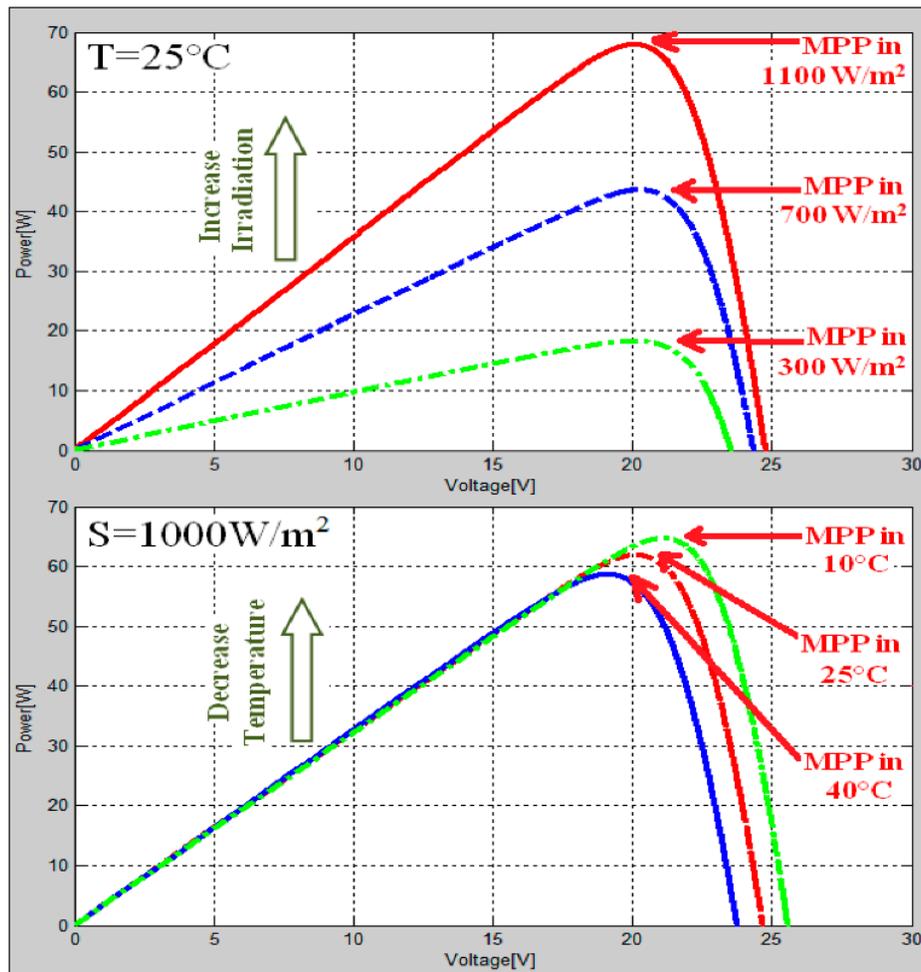


Figure 34 Variation du point de puissance maximale (MPP) avec les variations d'irradiation et de température [33]

Le convertisseur DC-DC est inclus entre le réseau de cellules photovoltaïques et l'unité de stockage d'énergie (charge) pour faire correspondre la tension du réseau solaire avec la tension de la batterie. Si le rapport cyclique D du convertisseur est modifié par un circuit de commande pour ajuster en permanence la tension de fonctionnement du panneau solaire à son point de puissance maximale V_{MPP} , cela signifie qu'il fonctionne comme un tracker de point de puissance maximale MPPT

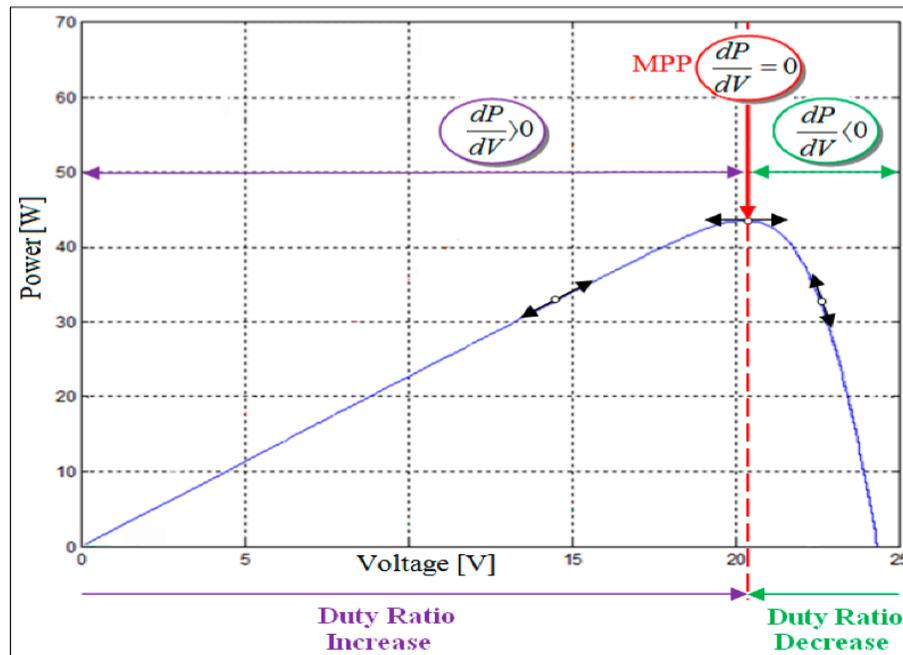


Figure 35 Le changement de direction du rapport cyclique D pour le suivi du MPP [33].

3.1.3 La configuration du contrôleur flou

Les systèmes flous sont de bons modèles pour les systèmes non linéaires. Les modèles flous sont basés sur des règles floues. Ces règles floues fournissent des informations sur les systèmes non linéaires incertains. Un contrôleur de logique floue se compose de trois opérations principales : « Fuzzification », « Inférence » et « défuzzification ». Les données d'entrée sont introduites dans un système basé sur la logique floue où les quantités physiques sont représentées sous forme de variables linguistiques avec des fonctions d'appartenance appropriées. Ces variables linguistiques sont ensuite utilisées dans les antécédents (If-Part) d'un ensemble de règles floues « If-Then » au sein d'un moteur d'inférence pour aboutir à un nouvel ensemble de variables linguistiques floues, ou un conséquent (Then-Part). La Figure 35 illustre la représentation schématique du contrôleur flou.

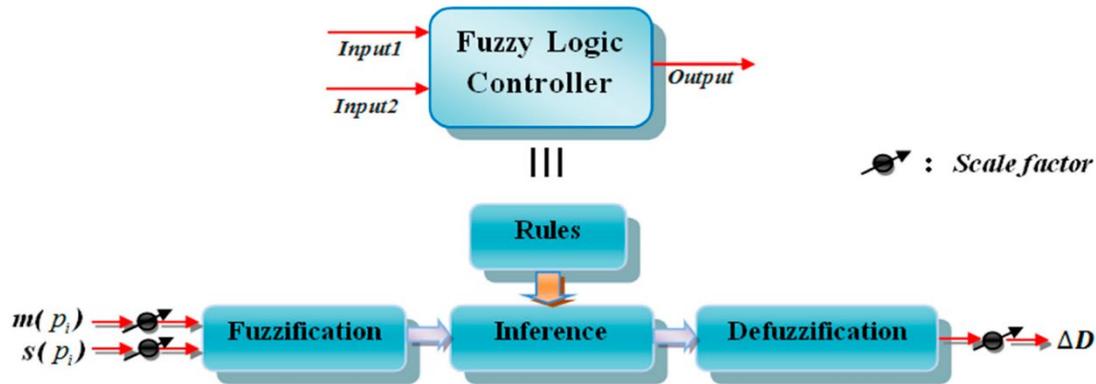


Figure 36 Configuration du contrôleur flou [33].

3.1.3.1 Fuzzification

Le circuit de commande mesure instantanément la tension $V(i)$ et le courant $I(i)$ du générateur photovoltaïque et calcule la puissance comme $P(i) = I(i) \times V(i)$. Le contrôleur analyse l'entrée $_1(i)$ qui représente la pente du point de fonctionnement actuel sur la courbe $PV(m(p_i))$ et l'entrée $_2(i)$ qui représente le taux d'approcher ou éloigner du point p_i vers MPP. Nos observations indiquent que la valeur de la pente d'un point p_i sur la courbe de la figure 34 (qui représente l'entrée $_1$) sera positif, négatif ou nul (zéro est le MPP). La valeur de la variation de la pente de deux points p_i et p_{i-1} sur la même courbe (et qui représente l'entrée $_2$) va être positif, négatif ou nul. Le contrôleur flou décidera d'augmenter, de diminuer ou de stabiliser la sortie de la commande, qui est ΔD [33].

3.1.3.2 La méthode d'inférence

La méthode d'inférence fonctionne de telle manière qu'une modification du rapport cyclique de la hacheur boost conduit à la tension V_{MPP} correspondant au MPP à la suite de l'analyse d'un nombre exhaustif de combinaisons de variables d'entrée et une analyse des sorties correspondantes [33].

3.1.3.3 Défuzzification

Après l'opération d'inférence, la sortie du contrôleur est exprimée sous la forme d'une courbe de variable linguistique. Des méthodes de défuzzification sont ensuite utilisées pour calculer et décoder la variable linguistique en une valeur numérique [33].

3.1.4 Extrait du MPP utilisant les méthodes Perturb and Observe (P&O)

La méthode P&O (perturber et observer) est l'approche la plus largement utilisée en MPPT. Il existe plusieurs variantes de la méthode P&O, dont celle décrite dans la figure 36 ci-dessous [33].

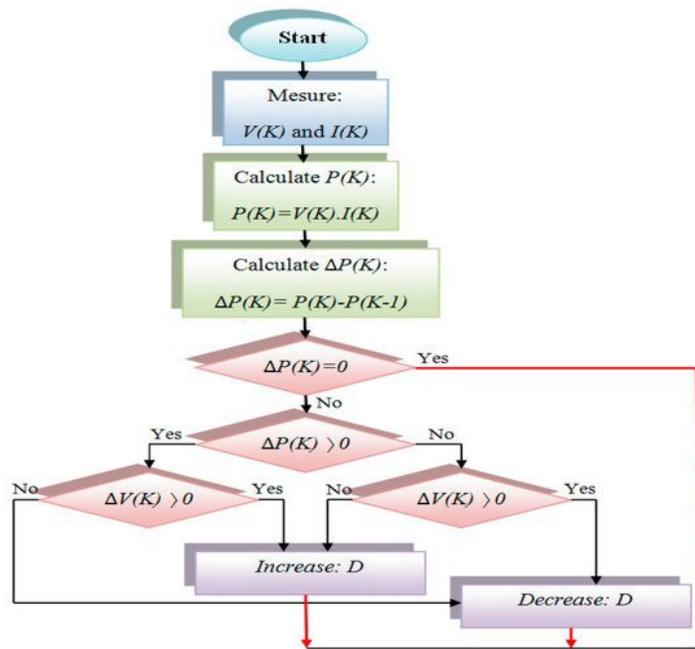


Figure 37 Organigramme de l'algorithme MPPT perturber et observer (P&O) utilisé [33]

3.1.5 Conclusion

Le coût de l'énergie solaire est le principal problème pour son potentiel de développement ultérieur. Par conséquent, la puissance d'extraction maximale est un paramètre important qui affecte le rendement total du système photovoltaïque et permet au projet photovoltaïque d'obtenir un meilleur retour sur investissement. Dans la référence [33], une méthode de logique floue permet d'obtenir plus rapidement une puissance de sortie plus grande et plus stable du module PV sous MPP. Afin d'illustrer les performances du contrôleur, un modèle Matlab-Simulink[®] a été établi et simulé pour différents scénarios de fonctionnement. Les résultats sont comparés avec les contrôleurs P&O couramment utilisés. Les résultats de la simulation ont prouvé une plus grande efficacité dans le suivi de la puissance maximale pour le contrôleur à logique floue. Les simulations ont montré que les différences de performances les plus significatives étaient obtenues avec des paramètres variant rapidement qui influencent la puissance de sortie (température, irradiance). De plus, le contrôleur basé sur la logique floue, par rapport au contrôleur P&O, affiche de meilleures performances en termes de délai de suivi de puissance maximum, de stabilité et de robustesse dans tous les cas. Les meilleures performances de stabilité et de robustesse du contrôleur basé sur la logique floue offrent des avantages majeurs dans l'atténuation des fluctuations de puissance. L'algorithme de logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. De plus, il se caractérise par un bon comportement transitoire. Cependant, la mise en œuvre de ce type d'algorithme est plus facile que les algorithmes classiques.

3.2 L'OPTIMISATION DE LA CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

3.2.1 Introduction

Le coût de l'énergie éolienne doit concurrencer les sources traditionnelles de combustibles fossiles. Il est donc essentiel et crucial. Les concepteurs et les fabricants d'éoliennes recherchent la meilleure solution qui correspond à un éventail d'objectifs et

contraintes de conception. Au cours des 30 dernières années, la fonction objective a évolué à partir d'une métrique de maximisation du facteur de puissance avant la production annuelle maximale d'électricité. Des alternatives ont été étudiées pour minimiser la masse des pales et maximiser la poussée et le couple du rotor. Cependant, l'objectif principal a toujours été de minimiser les coûts énergétiques, faisant ainsi de l'énergie éolienne un plus compétitif et économiquement attractif.

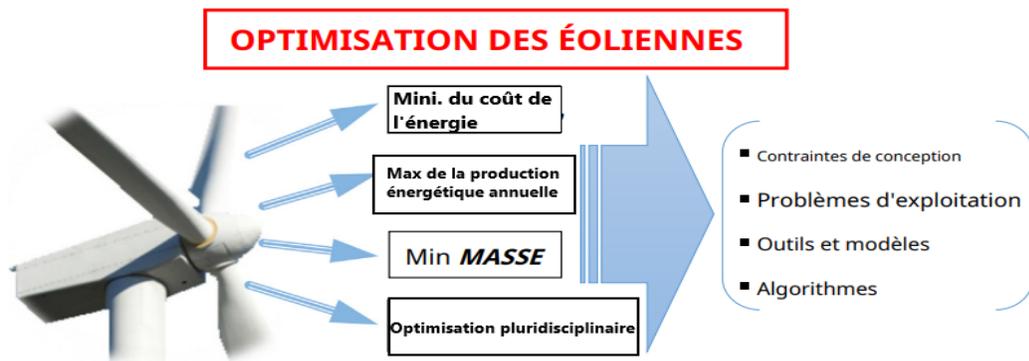


Figure 38 L'objectif principal d'optimisation des éoliennes [35]

3.2.2 Minimiser le coût de l'énergie

Le coût de l'énergie (COE) est un paramètre à minimiser qui est examiné comme la fonction objective principale et globale. Il s'exprime essentiellement comme un rapport entre le coût total annuel (CTA) et la production annuelle d'énergie (AEP). Étant donné que les coûts d'exploitation et de maintenance représentent un faible pourcentage du coût d'investissement et qu'une éolienne bien conçue avec un faible coût d'énergie a un rotor aérodynamiquement efficace, nous pouvons écrire :

$$COE = \frac{CTA}{AEP} \quad (4)$$

3.2.3 Maximisation de la production annuelle d'énergie

L'objectif d'une optimisation aérodynamique est considéré en absence d'un modèle structurel et de coût fiable. Bien que l'objectif le plus populaire pour l'optimisation actuelle

des éoliennes soit la minimisation du coût de l'énergie, certaines tendances sont orientées vers l'optimisation des performances aérodynamiques d'une éolienne soit par la maximisation de la production d'électricité à une vitesse de vent fixe ou par la maximisation de l'AEP pour une distribution de vent donnée.

L'énergie annuelle est généralement calculée par intégration de la puissance de l'éolienne combinée à une distribution de la vitesse du vent (par exemple Weibull) sur le spectre de vitesse du vent [35].

$$AEP = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P(V)f(V)dV \quad (5)$$

où $P(V)$ est la courbe de puissance de l'éolienne, $f(V)$ est la distribution de la vitesse du vent.

3.2.4 Minimisation de la masse de la pale

La masse minimale de la lame a été définie comme la fonction objectif dans une revue de Chen et al. [34] soutiennent qu'une masse de lame plus légère sera bénéfique pour améliorer la durée de vie en fatigue en fonction des exigences de résistance et de rigidité de la pale. Par conséquent, la masse minimale de la pale d'éolienne a été choisie comme fonction objectif.

3.2.5 Contraintes de conception

L'optimisation avec contraintes est un processus mathématique d'optimisation de la fonction objectif à un vecteur de variables de conception sous un ensemble de contraintes.

En général, imposer des contraintes au problème augmente la difficulté de la formulation et le risque de compliquer la conception. Nous énumérons les contraintes de conception utilisées optimisation des performances des éoliennes. Elles sont réparties en trois catégories : contraintes géométriques, aérodynamique et structurelles [35].

3.2.5.1 Géométrie

a) GARDE AU SOL

Afin d'éviter les problèmes de sécurité, une garde au sol entre la pointe de la lame et le sol est définie. Diveux et al. [36] réglent cette distance à 15 m.

$$\frac{D_R}{2} + 15 \leq H_{moyeu} \quad (6)$$

Où D_R est le diamètre du rotor, H_{moyeu} est la hauteur du moyeu.

b) DEPLACEMENTS ET DEVIATION DE LA POINTE

La limitation de déplacement des nœuds locaux (u) et/ou une déviation maximale de la pointe (δ) étaient employés. Dans [38] seuls deux groupes de cas de charge ont été choisis pour la conception de la pale et l'évaluation de la déflexion de la pointe.

Deux ensembles de contraintes de déplacement ont été définis par Jureczko et al. [37]. La première contrainte de déplacement est définie pour les nœuds individuels dans le modèle numérique de la pale afin d'assurer la stabilité globale. La deuxième contrainte est sur le bout de pale pour garantir une stabilité locale.

$$U(X) \leq U_{max} \quad (7)$$

$$\delta(X) \leq \delta_{max} \quad (8)$$

Où $u(x)$ et δ sont respectivement les déplacements locaux et la flèche de pointe des nœuds le long du modèle de pale, U_{max} (0,1 m) et δ_{max} (0,15 m) sont les limites. Liao et al. [39] ont choisi de considérer un cas de charge pour prédire la déflexion de la pointe dans la conception optimale, celui qui génère la même déflexion de pointe pour la pale initiale après l'analyse par FOCUS5.

3.2.5.2 Aérodynamique

Grazzo [40] impose également une épaisseur de bord de fuite minimale de 0,25 et un rayon de bord d'attaque minimal de $0,015c$ pour assurer la faisabilité du profil aérodynamique et assurer une séparation appropriée du bord de fuite. Dans [41], une épaisseur minimale de profil aérodynamique de 35 % de la corde et une épaisseur minimale de coque au bord de fuite de 1 % (pour tenir compte des exigences de fabrication) de la corde ont été choisies. Bizzarrini et al. [42] impose une épaisseur minimale de 18% de la corde et à l'extrémité une épaisseur de bord de fuite de 0,25% de la corde pour assurer la praticabilité et la faisabilité du point de vue de la fabrication.

Makis et al. [44] s'est assuré que l'épaisseur de la coque t_s et la toile t_w diminuent le long de la travée. Deux inégalités supplémentaires contraintes sur leurs épaisseurs en termes d'épaisseur de section maximale t ont été ajoutés comme suit

$$t_s \leq \frac{1}{2} t \quad t_w \leq 2 t$$

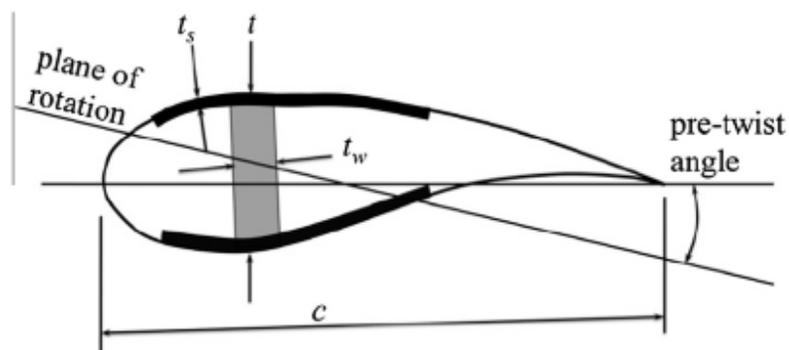


Figure 39 Schéma de section de pale. [35]

Le changement de courbure des surfaces supérieure et inférieure du profil aérodynamique est limité. Par exemple, la partie interne de la pale est conçue avec un profil aérodynamique plus épais pour résister aux charges tandis que la partie externe peut être réalisée avec un profil aérodynamique plus fin [45].

3.3 L'OPTIMISATION DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE DE LA BIOMASSE

3.3.1 Systèmes de cogénération à la biomasse

La cogénération est une production combinée de chaleur et d'électricité, adaptée à systèmes de combustion de combustibles fossiles ou de biocarburants (biomasse). La cogénération est la meilleure solution pour économiser l'énergie et préserver l'environnement. La cogénération est une technologie bien avancée qui existe depuis plus d'un siècle. À la fin du XIXe siècle, plusieurs usines de fabrication ont adopté cette technologie. La cogénération nécessite un échangeur de chaleur pour absorber et récupérer la chaleur d'échappement. La cogénération avec de la biomasse est considérée comme une alternative efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. De nombreuses recherches ont été menées ces dernières années pour améliorer l'efficacité économique et environnementale des systèmes de cogénération à la biomasse. Ces systèmes de cogénération sont de plus en plus populaires. Plusieurs technologies et systèmes de cogénération ont été développés ces dernières années, dont certains conviennent aux grandes centrales électriques et d'autres à la moyenne puissance et à la micro-cogénération.

3.3.2 Cycle de Rankin organique (ORC)

Depuis les années 1980, le marché ORC a connu une croissance exponentielle. Les applications ORC ont suscité beaucoup d'intérêt économique et environnemental. La technologie ORC (Figure 39) a atteint un haut degré de maturité pour les applications biomasse, elle ne nécessite qu'une source de chaleur suffisante. Le système ORC peut être intégré dans toute installation industrielle équipée d'un système de chauffage à basse température pour récupérer l'énergie perdue sous forme de chaleur et la convertir en électricité. L'électricité produite par les systèmes ORC à biomasse est considérée comme neutre en carbone, améliorant ainsi le profil environnemental d'une entreprise et favorisant la transformation du secteur forestier vers l'utilisation de sources d'énergie plus respectueuses de l'environnement [46].

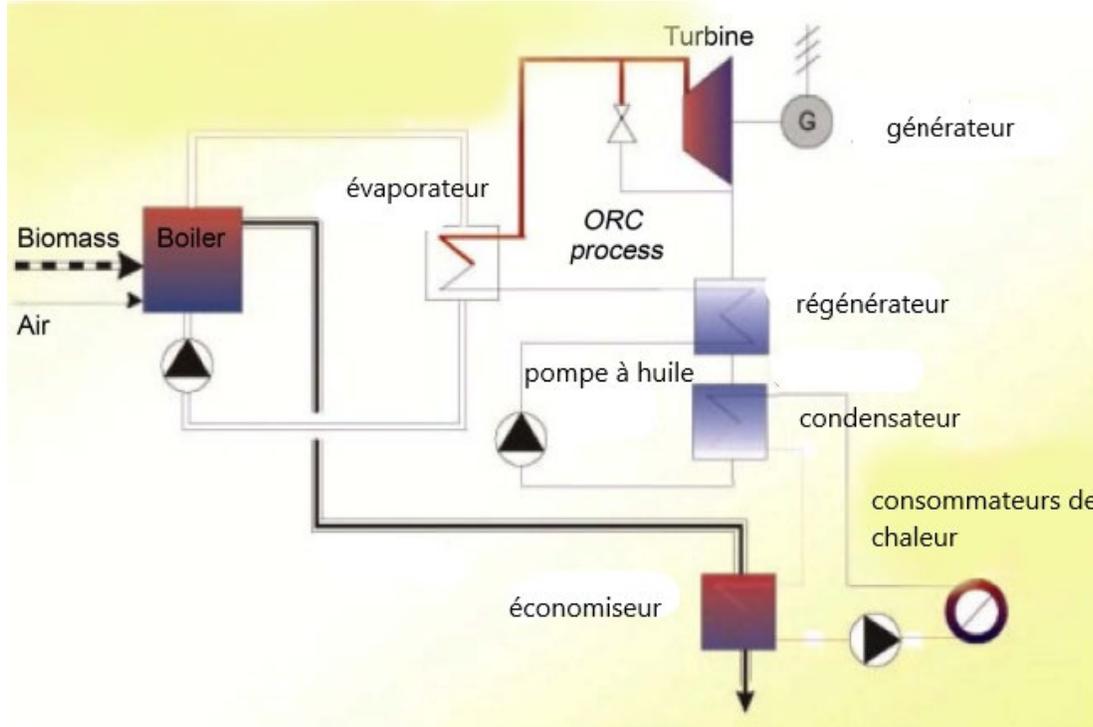


Figure 40 Schéma du cycle organique de Rankine [46]

Au lieu de l'eau, le cycle organique de Rankine utilise un fluide organique aux propriétés thermodynamiques favorables comme fluide caloporteur. La température d'évaporation des fluides organiques est inférieure à la température d'évaporation de l'eau, ce qui se traduit par un rendement plus élevé dans les installations de cogénération à cycle ORC. L'ORC dispose de deux circuits, l'un pour l'huile thermique et l'autre pour le fluide organique. La chaleur dégagée par la combustion de la biomasse est transmise à travers un cycle d'huile par un échangeur au fluide organique qui s'évapore à haute température et haute pression. Le système ORC se compose de quatre composants principaux, à savoir une pompe, un évaporateur, une turbine et un condenseur. La vapeur organique surchauffée est détendue dans une turbine puis condensée dans un condenseur et renvoyée à la pompe de circulation pour démarrer un nouveau cycle. Le condenseur peut agir comme un échangeur de chaleur pour envoyer de la chaleur à distance à basse température (par exemple chauffage urbain). Le liquide organique condensé est pompé à travers le régénérateur vers l'évaporateur.

La technologie ORC est adaptée aux moyennes puissances. La chaleur est généralement fournie à une température d'environ 300 °C et la condensation se produit à environ 90 °C.

3.4 SYSTEMES DE STOCKAGE ENERGIES RENOUVELABLES

3.4.1 Introduction

L'un des défis les plus importants dans le fonctionnement de tout réseau électrique est l'équilibre énergétique entre l'offre et la demande. La production d'électricité et la prévision de la demande de charge sont des paramètres clés pour un arrangement de production et une gestion de l'énergie appropriés. Les services publics ont développé deux mécanismes afin de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité de manière rentable. Le premier mécanisme est basé sur l'intégration de systèmes de stockage d'énergie et le second mécanisme se concentre sur la minimisation de la charge de pointe en encourageant les utilisateurs finaux à modifier leurs comportements d'utilisation de l'énergie avec des avantages incitatifs. Le premier mécanisme est principalement limité par ses coûts initiaux et de fonctionnement élevés. Le deuxième mécanisme est très dépendant des capacités et des volontaires des utilisateurs finaux. Par conséquent, les programmes de gestion du côté de la demande doivent être soigneusement conçus pour stimuler les capacités des utilisateurs finaux du côté de la demande d'électricité. La réponse à la demande et la gestion de la demande sont deux termes utilisés pour décrire les programmes développés pour influencer les habitudes de consommation d'électricité des clients. La réponse à la demande est un terme utilisé pour les programmes conçus pour encourager les utilisateurs finaux à réduire à court terme la demande d'énergie en réponse à un signal de prix. Les programmes de gestion de la demande favorisent une plus grande efficacité énergétique du côté de l'utilisateur final. Les programmes de réponse à la demande sont conçus pour répondre aux prix et/ou à la disponibilité de l'électricité sur le marché. Il offre une variété de bénéfices économiques et opérationnels aux clients de l'électricité et aux gestionnaires de réseau.

3.4.2 Stockage d'énergie par batteries à flux (FBES)

Les batteries à flux sont un système à deux électrolytes dans lequel les composés chimiques utilisés pour le stockage de l'énergie sont à l'état liquide, en solution avec l'électrolyte. Ils s'affranchissent des limitations des accumulateurs électrochimiques classiques (plomb-acide ou nickel-cadmium par exemple) dans lesquels les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes sur lesquelles ils se forment. Il s'agit donc d'un système à masse limitée, ce qui limite évidemment la capacité des batteries standards.

Différents types d'électrolytes ont été développés en utilisant le brome comme élément central : avec du zinc (ZnBr), du sodium (NaBr), du vanadium (VBr) et, plus récemment, du polysulfure de sodium. La réaction électrochimique à travers une membrane dans la cellule peut être inversée (charge-décharge). En utilisant de grands réservoirs et en couplant un grand nombre de cellules, de grandes quantités d'énergie peuvent être stockées puis libérées en pompant de l'électrolyte dans les réservoirs (voir Figure 42).

Le meilleur exemple de batterie à flux a été développé en 2003 par Regenesys Technologies, en Angleterre, avec une capacité de stockage de 15 MW à 120 MWh. Il a depuis été mis à niveau vers un système électrochimique entièrement basé sur le vanadium. L'efficacité globale du stockage de l'électricité est d'environ 75 %. Les batteries à flux sont un système à deux électrolytes dans lequel les composés chimiques utilisés pour le stockage de l'énergie sont à l'état liquide, en solution avec l'électrolyte. Ils s'affranchissent des limitations des accumulateurs électrochimiques classiques (plomb-acide ou nickel-cadmium par exemple) dans lesquels les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes sur lesquelles ils se forment. Il s'agit donc d'un système à masse limitée, ce qui limite évidemment la capacité des batteries standards [47].

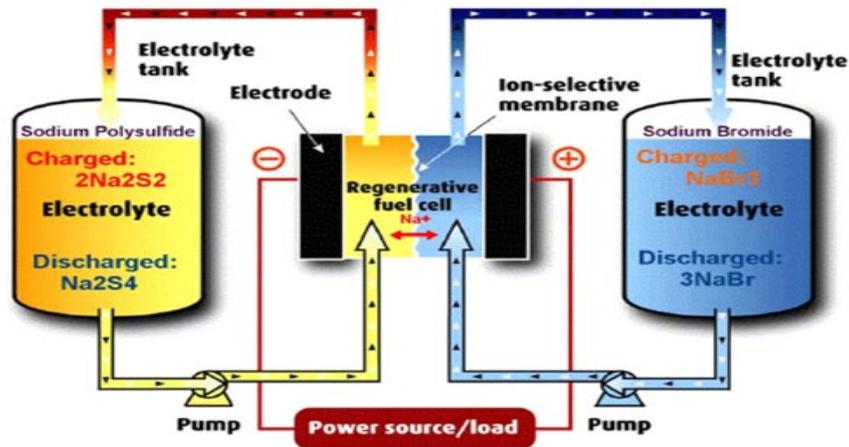


Figure 41 Illustration d'une batterie à circulation de type PSB (Polysulfide Bromide Battery) [47]

3.4.3 Stockage de produits chimiques

Le stockage des produits chimiques est réalisé grâce à des accumulateurs. Ces systèmes ont la double fonction de stocker et de restituer de l'électricité en alternant les phases de charge-décharge. Ils peuvent transformer l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique et inversement, sans émission nocive ni bruit, et nécessitent peu d'entretien. Il existe un large éventail de technologies utilisées dans la fabrication des accumulateurs (plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, nickel-fer, zinc-air, fer-air, sodium-soufre, lithium-ion, lithium polymère, etc.). Leurs principaux atouts sont leurs densités énergétiques (jusqu'à 150 et 2000Wh/kg pour lithium) et leur maturité technologique (Figure 13). Leur principal inconvénient est cependant leur durabilité relativement faible pour les cyclages de grande amplitude (quelques 100 à quelques 1000 cycles).

Ils sont souvent utilisés dans des systèmes portables, mais aussi dans des applications permanentes (sauvegarde de réseaux de secours, stockage d'énergies renouvelables en site isolé).

La durée minimale de décharge des accumulateurs électrochimiques atteint rarement moins de 15min. Cependant, pour certaines applications, des puissances allant jusqu'à

100W/kg, voire quelques kW/kg, peuvent être atteintes en quelques secondes ou minutes. Contrairement aux condensateurs, leur tension reste stable en fonction du niveau de charge. Néanmoins, entre une opération de recharge de forte puissance à un niveau de charge proche du maximum et son contraire, c'est-à-dire une décharge de puissance proche de la décharge complète, la tension peut facilement varier dans un rapport de deux [47].

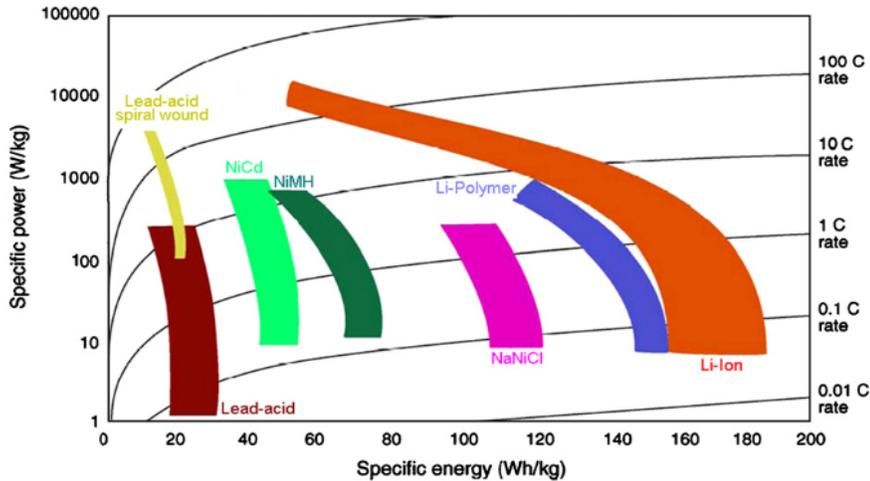


Figure 42 Répartition des différents accumulateurs électrochimiques selon leurs densités d'énergie, leur puissance [47]

3.4.4 Stockage d'énergie thermique (TES)

Il existe deux types de systèmes de stockage d'Énergie thermique (TES), selon qu'ils utilisent la chaleur sensible ou latente. Le TES à chaleur de fusion latente utilise la transition liquide-solide d'un matériau à température constante. Au cours de l'accumulation, le matériau en vrac passera de l'état solide à l'état liquide et, lors de la récupération, redeviendra solide. Les transferts de chaleur entre l'accumulateur thermique et l'environnement extérieur se font par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. L'énergie est stockée à une température donnée, plus la chaleur est élevée, plus la concentration est élevée. L'enthalpie de fusion croît avec la température de fusion du matériau en vrac utilisé.

Malgré sa nature hautement corrosive, l'hydroxyde de sodium est considéré comme un bon fluide de stockage. Il a une température de fusion élevée, un coefficient de conductivité thermique adéquat, une stabilité à haute température et une très faible pression de vapeur.

Entre 120 et 3601 C, il a une capacité de stockage thermique spécifique (masse ou volume) de 744MJ/t, soit 1332MJ/m³.

La mise en place de systèmes d'accumulation de chaleur latente à la soude dans les chaudières électriques pourrait contribuer à limiter la demande d'énergie électrique dans les procédés industriels où les besoins en vapeur ne sont pas continus et varient en intensité [48].

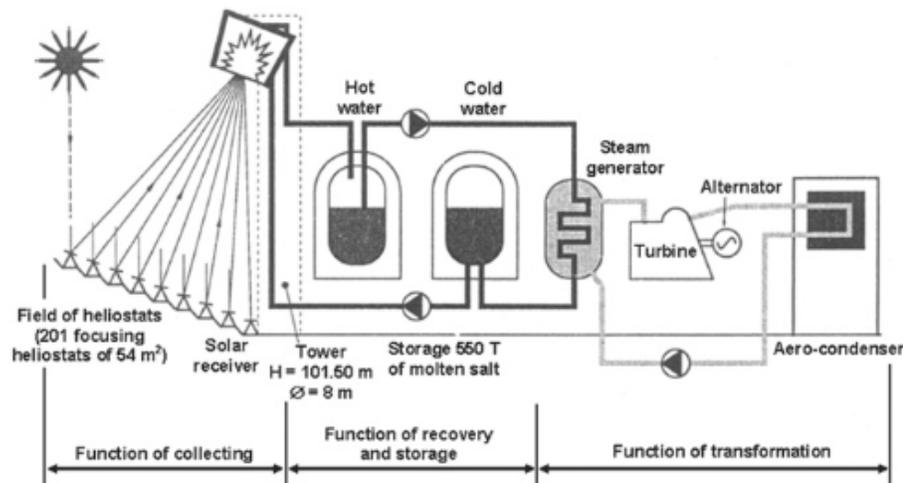


Figure 43 Stockage d'énergie thermique [48]

Le stockage thermique de la chaleur sensible est réalisé en chauffant un matériau en vrac (sodium, sel fondu, eau sous pression, etc.) qui ne change pas d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau, qui entraîne un système de turbo-alternateur.

3.4.5 Conclusion

Les piles à combustible peuvent être utilisées en production décentralisée (notamment les centrales de petite puissance, résidentiel, secours, etc.), en alimentation spontanée liée ou non au réseau, en moyenne puissance cogénération (quelques 100 kW), et production centralisée d'électricité sans valorisation thermique. Ils peuvent également représenter une

solution pour les zones isolées où l'installation de lignes électriques est trop difficile ou coûteuse (zones de montagne, etc.).

CHAPITRE 4 DIMENSIONNEMENT ENERGETIQUE DES EDIFICES

4.1 INTRODUCTION

La Municipalité d'Esprit-Saint au Bas-Saint-Laurent fait face à une problématique majeure de gestion de coûts d'électricité pour ses édifices publics (mairie, centre communautaire, église, bibliothèque municipale et école). À eux seuls, ces édifices coutent plus de 200 000\$ par an pour la communauté. Comme la municipalité doit assumer des coûts énergétiques croissants, sans une solution durable, ces édifices publics pourraient être abandonnés ou détruits. Le projet permettra, entre autres, la sauvegarde des édifices publics et la possibilité de les requalifier pour des usages communautaires. Le site deviendra aussi un site permanent d'expérimentation et de démonstration scientifique grâce au partenariat avec le Laboratoire de recherche en énergie éolienne de l'Université du Québec à Rimouski. Concrètement, les résultats visés sont :

- Diminuer les coûts d'énergie par l'utilisation d'énergies renouvelables.
- Sauvegarde des édifices publics de la municipalité, notamment l'église qui sera requalifiée en centre culturel et historique en résolvant en partie les coûts d'énergie.
- Remplacer les énergies fossiles encore largement utilisées pour chauffer les édifices publics dans les petites communautés. Utilisation du potentiel énergétique solaire et éolien de la municipalité.
- Rendre accessible tous les édifices publics de la municipalité à l'année ;
- Une centrale expérimentale scientifique de production d'énergies renouvelables, qui deviendrait aussi un centre de diffusion scientifique et un attrait touristique additionnel pour la communauté.

4.2 PRESENTATION ARCHITECTURALE DE SES EDIFICES PUBLICS (MAIRIE, CENTRE COMMUNAUTAIRE, ÉGLISE, BIBLIOTHEQUE MUNICIPALE ET ECOLE)

Les édifices publics de la Municipalité d'Esprit-Saint seront l'objet principal de cette étude. Ils sont localisés au Québec dans la région de Bas-Saint-Laurent, ses coordonnées

géographiques sont 48°04'00.0" Nord et 68°34'00.0"Ouest. Dans la région, la température moyenne est de 5°C et la précipitation moyenne annuelle est de 905.7 mm. L'étude concerne uniquement ses édifices publics (Mairie, Centre communautaire, Église, Bibliothèque municipale et école). La figure 43 met en évidence la topologie ses édifices alors que la figure 44 illustre des différents édifices publics de la Municipalité d'Esprit-Saint.



Figure 44 Présentation des différents édifices publics



Figure 45 Les différents édifices publics de la Municipalité d'Esprit-Saint

4.3 METHODOLOGIE

Dans cette section, nous décrivons les différentes étapes de notre travail : équipement, lectures de puissance, calculs de puissance pour les modules individuels, enquêtes sur les heures de fonctionnement des équipements, calcul de la consommation d'énergie quotidienne et redimensionnement manuel.

4.3.1 Lecture de puissance

Après avoir fait l'inventaire, nous avons enregistré la puissance nominale de chaque appareil électrique. Cette information se trouve le plus souvent sur leur plaque signalétique.

4.3.2 Calcul de la puissance des différents édifices

La puissance globale de l'ensemble de notre système a été obtenue par la formule

$$P_t = \sum_i^n P_i \quad (9)$$

P_t : puissance totale

P_i : puissance de l'appareil i

4.3.3 Étude des heures de fonctionnement

Une étude sur les heures de consommation des appareils électriques a été effectuée auprès des utilisateurs afin de rendre notre dimensionnement plus raisonnable.

La consommation énergétique quotidienne est obtenue en multipliant la puissance de l'appareil avec son temps de fonctionnement. Comme indiqué dans la formule

$$E_t = \sum_i^n P_i \times t_i \quad (10)$$

E_t : énergie journalière totale consommée

t_i : durée de fonctionnement de l'appareil i

4.4 DIMENSIONNEMENT MANUEL

4.4.1 Prévision de l'énergie quotidienne à produire

L'énergie à dissiper (E_c) n'est pas suffisante pour définir la taille du champ photovoltaïque en raison des pertes subies pendant le fonctionnement du panneau solaire. L'énergie générée (E_p) est obtenue par l'équation suivante

$$E_p = E_c \times K_1 \quad (11)$$

K_1 : coefficient de perte

Calcul de la puissance crête (P_c) à installer

La puissance crête est la puissance maximale mesurée dans la condition standard de test Ensoleillement nominal de 1000 W/m² et température 25° C. Elle est obtenue avec la formule (12) suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{I_j \times K_2} \quad (12)$$

E_p : Énergie à produire

K_2 : Coefficient de perte = 0,6

I_j : Irradiation journalière = 5,8 kWh /m²/j

4.4.2 Calcul du nombre de panneaux pour le champ PV

Le nombre de panneaux PV à être installé soit en série soit en parallèle est calculé selon les formules suivantes

$$N_{série} = \frac{U_{batt}}{U_{mod}} \quad (13)$$

$$N_{pile} = \frac{P_c}{P_{mod}} \quad (14)$$

$N_{série}$: nombre de panneaux en série

N_{pile} : nombre de panneaux en parallèle

U_{batt} : tension de la batterie

U_{mod} : tension du module

P_c : Puissance crête

P_{mod} : puissance du module

4.4.3 Détermination de la puissance réelle à installer

La puissance définitive à installer est obtenue par la formule (15)

$$P_{inst} = N_{série} \times N_{pile} \times P_{mod} \quad (15)$$

4.4.4 Dimensionnement du régulateur

Pour dimensionner le régulateur, il faut connaître la tension nominale et l'intensité PV maximale. Ces derniers sont obtenus par la formule (16) et (17) sont les suivants. Utilisez ensuite la formule (18) pour calculer le nombre d'ajustement du système

$$I_r = 1.5 \times I_m \quad (16)$$

I_r = intensité du régulateur

I_m = intensité (courant) maximal que délivré le champ PV

1,5 : représente les pertes engendrées par le régulateur

$$I_m = \frac{P_{inst}}{U_{syst}} \quad (17)$$

$$N_{reg} = \frac{I_r}{I_{unt.reg}} \quad (18)$$

$I_{unt.reg}$ = Courant unitaire du régulateur

N_{reg} = nombre de régulateur

4.4.5 Dimensionnement du stockage

La capacité de la batterie et le nombre de batteries à installer sont respectivement définis dans les formules suivantes :

$$C_b = \frac{E_p \times \text{Autonomie (nb de jour)}}{U_{sys} \times \text{degré de décharge}} \quad (19)$$

$$N_b = \frac{C_b}{C_{unit.b}} \quad (20)$$

C_b : Capacité de la batterie

N_b : Nombre de batterie

$C_{unit.b}$: Capacité unitaire de la batterie

Le système produit du courant continu. L'onduleur le convertira en courant choisir. Cependant, la puissance de l'onduleur doit toujours être supérieure à la puissance de crête ($P_{ond} > P_{cre}$) Le nombre d'onduleurs requis par le système est obtenu par la formule.

$$N_{ond} = \frac{P_{ond}}{P_{unit.ond}} \quad (21)$$

N_{ond} : nombre d'onduleur

P_{ond} : puissance de l'onduleur générale

$P_{unit.ond}$: puissance unitaire de l'onduleur secondaire

4.5 PRESENTATION DU LOGICIEL HOMER PRO

Le logiciel HOMER Pro est la norme mondiale pour optimiser la conception des micro-réseaux dans tous les secteurs, de l'électricité des villages et des services connectés au réseau. HOMER Pro, ou HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), simplifie la tâche d'évaluation des conceptions pour les systèmes électriques hors réseau et connectés au réseau. Lorsque vous concevez un système d'alimentation, vous devez prendre de nombreuses décisions concernant la configuration du système, telles que :

- Quels composants sont les meilleurs pour ce système ?
- Combien et quelle taille de chaque composant sont les plus efficaces ?

Le grand nombre d'options technologiques, la variation des coûts et la disponibilité des ressources énergétiques rendent ces décisions difficiles. Les algorithmes d'optimisation et d'analyse de sensibilité d'HOMER facilitent l'évaluation des nombreuses configurations possibles du système.

4.6 PRESENTATION DES DONNEES :

4.6.1 Bilan de puissance

L'équilibrage de puissance est une étape importante dans le dimensionnement des installations électriques. Il prend en compte la puissance crête de la structure, la puissance totale de tous les appareils fonctionnent simultanément. Pour une plus grande précision, le facteur de simultanéité (K_s) peut être utilisé pour déterminer les conditions d'installation et d'utilisation de tous les récepteurs ou circuits des édifices publics. De plus, nous pouvons également utiliser le rapport cyclique (K_u) pour déterminer l'utilisation de chaque récepteur dans le temps. Par expérience, il est très peu probable que toutes les charges d'une installation

fonctionnent en même temps. Cependant, dans notre conception, il n'est pas nécessaire d'utiliser le K_s et K_u parce qu'une charge supplémentaire peut apparaître. Pour ne pas subir un tel accident, le pic de puissance utilisé serait un peu surdimensionné.

4.6.2 Profil de charge journalière de des édifices publics

Chaque édifice dispose de différents équipements électriques (chauffage, ordinateur, fontaine et matériels lampe, frigos, imprimante, chauffe-eau, de travaux pratiques). Ainsi, leurs profils de charges sont représentés de la figure 45 à la figure 49.

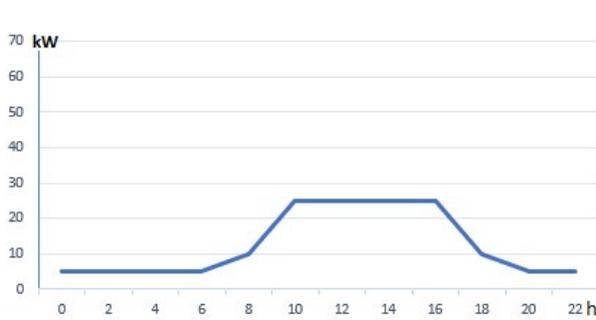


Figure 46 Profil de charge de l'église

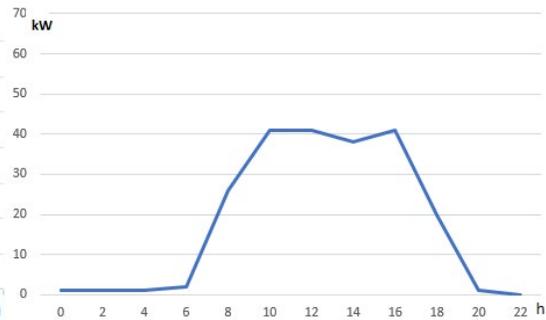


Figure 47 Profil de charge de la bibliothèque

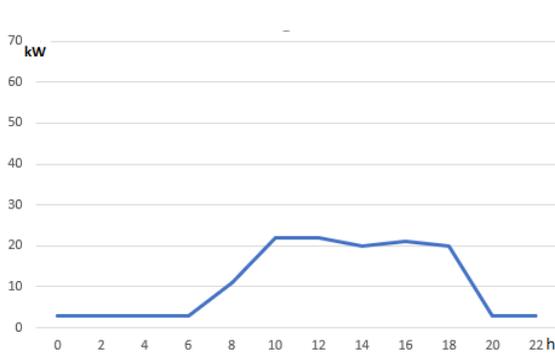


Figure 48 Profil de charge de la mairie

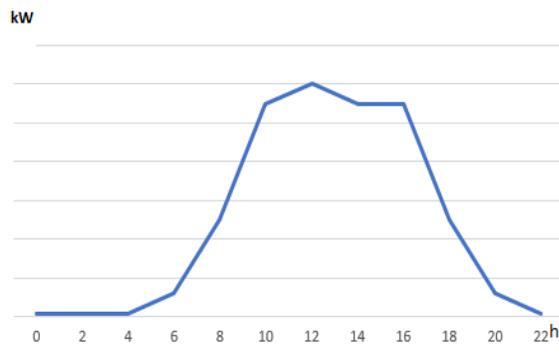


Figure 49 Profil de charge de l'école

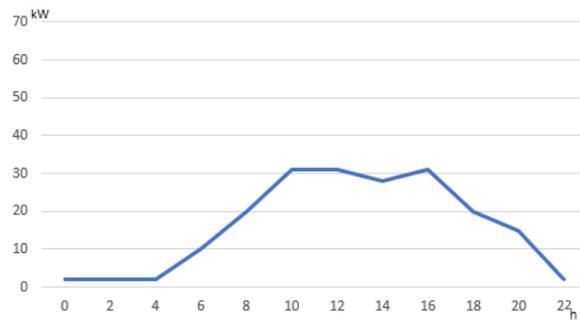


Figure 50 Profil de charge de centre communautaire

Selon la courbe de charge, la puissance commence à évoluer à 07h30 et culmine à 09h00. Ce pic est resté jusqu'à 18 heures, se formant à la descente. En effet, une baisse de 13h à 15h a également été constatée, ce qui marque le temps de pause pour les différentes structures. Mais il est important de noter que les exigences envers les écoles sont plus élevées, car il y a plus de bureaux, plus de charges électriques.

4.6.3 Profil de charge journalière total

La figure 32 montre les profils de charges globales des bâtiments publics obtenus à partir des profils de différentes structures. Comme les autres profils, il augmente à partir de 7h du matin pour culminer autour de 179 kW vers 18h. Mais entre 13h et 15h, une baisse de charge a été constatée pour marquer l'heure de pause.

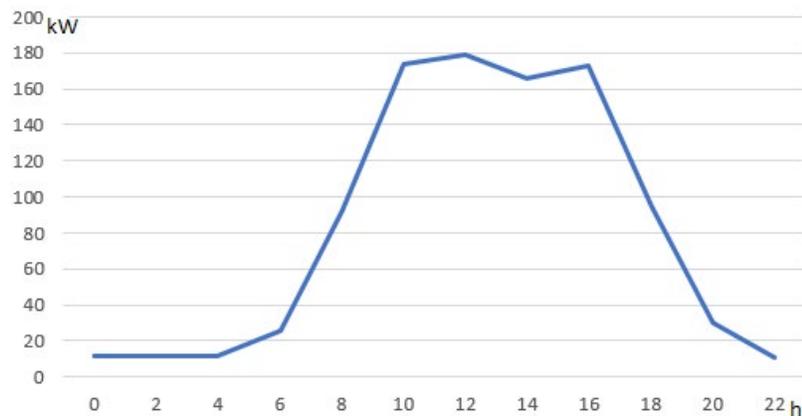


Figure 51 La puissance de pic obtenue lors du dimensionnement

$$P_p = 179 \text{ kW}$$

4.6.4 Bilan énergétique journalier des édifices publics

La figure 51 montre la répartition de la consommation énergétique journalière des différentes structures des édifices publics. Cette répartition montre que l'école et la bibliothèque sont respectivement les plus grands consommateurs avec 23.3 % et 19.7 % de l'énergie journalière totale. En effet, c'est le fonctionnement de tous ces appareils électroniques qui expliquent entre autres les raisons de cette surconsommation énergétique. Par ailleurs, l'école et la bibliothèque, sur le plan de la consommation non seulement à cause de ces appareils électroniques mais également à cause de la fréquentation des écoliers dans la structure accompagnée de leurs outils informatiques.

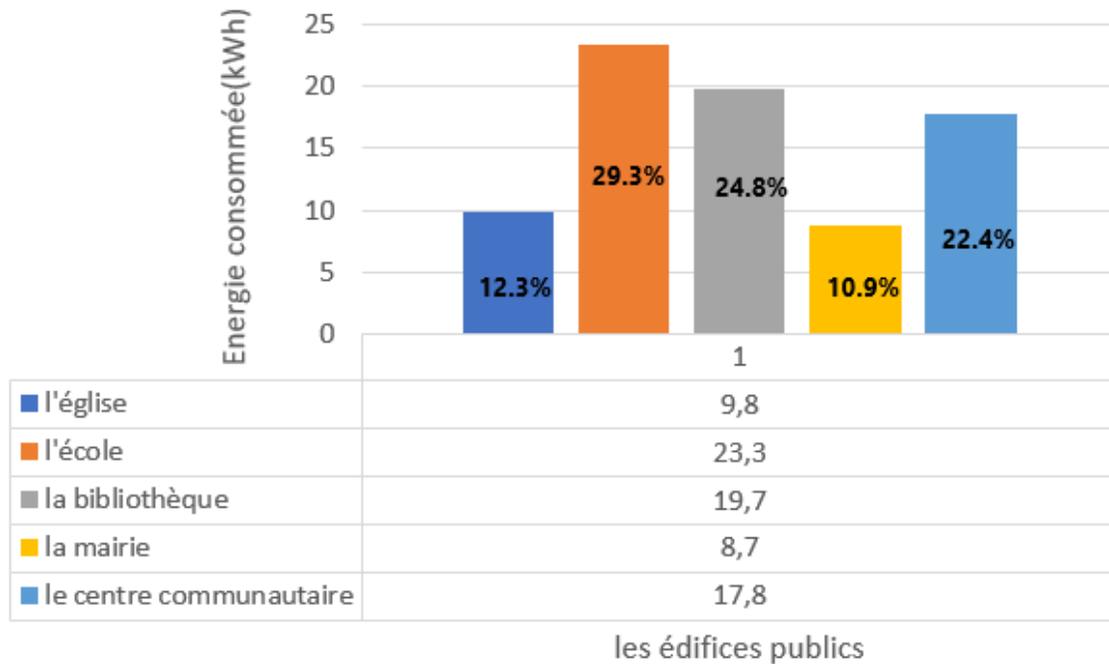


Figure 52 Taux de répartition énergétique journalière

Le tableau 1 résume le bilan de puissance et le bilan énergétique des édifices publics.

Tableau 1 Le bilan de puissance et le bilan énergétique des édifices publics

Les édifices	Puissances Estimées (kW)	Puissances Estimées Mensuelle (kW)	Energies Consommées Journalière (kWh)	Energies Consommées Mensuelle (kWh)
La bibliothèque	20,8	520	133,12	3461,12
L'école	25,3	632,5	161,92	4209,9
La mairie	15,6	390	99,84	2595,84
L'église	9,5	237,5	60,8	1580,8
Le centre communautaire	17,7	442,5	113,28	2945,2

La consommation énergétique journalière (E_c) de ses édifices publics est de 568,96 kWh soit une consommation moyenne mensuelle de 14,79 MWh.

4.7 CONCLUSION

Ce chapitre décrit les données utilisées dans cette mémoire. Les données météorologiques de base sont données de la NASA. Le bilan énergétique des différentes structures a été analysé mais aussi la répartition de la consommation en fonction des structures d'une part et les appareils d'autre part. Dans ce qui suit, nous ferons une présentation des solutions proposées puis le dimensionnement de ces solutions afin de déterminer la taille de leurs différents équipements.

CHAPITRE 5 ÉTUDE TECHNIQUE : CHOIX DES SOLUTIONS

5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous réaliserons une étude appliquée à différentes structures des bâtiments publics. Une description détaillée de chaque type de système proposé sera faite. Ainsi, la taille des différents constituants pour chaque solution sera établie.

5.2 DIMENSIONNEMENT DES SOLUTIONS PROPOSEES

La figure 53 résume les différentes solutions proposées

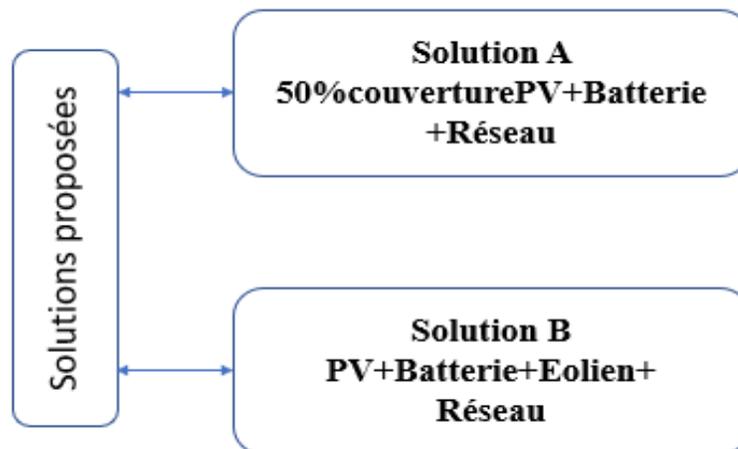


Figure 53 Les différentes solutions proposées

5.3 DESCRIPTION DU SYSTEME SOLUTION A

La figure 53 illustre la description du système utilisé dans la solution proposée A.

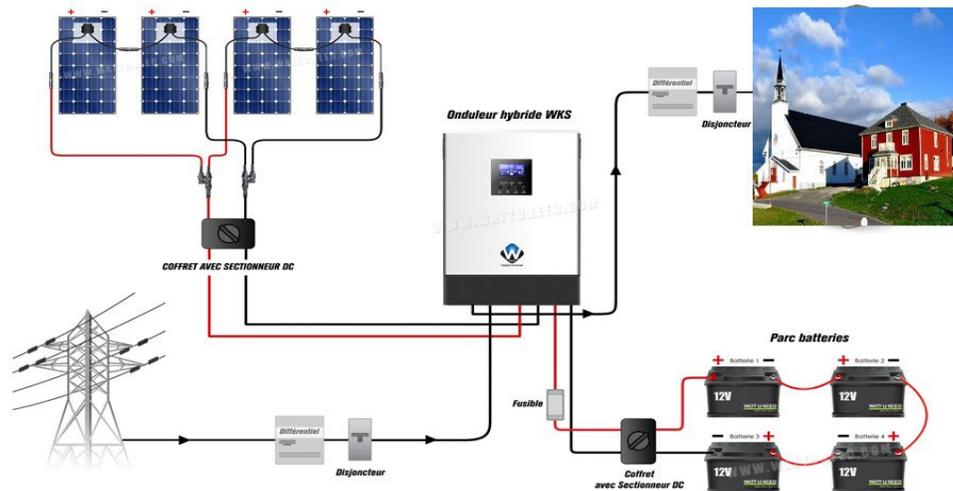


Figure 54 Représentation du système : PV + batterie + Réseau

Avec cette configuration, le système dispose d'un onduleur hybride qui peut jouer simultanément le rôle des régulateurs et des onduleurs. Il est associé à la batterie et fonctionne en parallèle avec le réseau d'électricité publique. Pendant la journée, la production du champ photovoltaïque est directement consommée par la charge. Cette consommation directe est possible grâce à un onduleur qui convertit le courant CC du PV en alimentation CA utilisable par la charge CA. Cependant, s'il est insuffisant pour la charge, le réseau intervient pour combler le manque à gagner.

5.3.1 Dimensionnement des composants du système

Dans cette partie, le logiciel HOMER Pro est utilisé pour effectuer le travail. Cela nous permettra de régler et d'optimiser le système.

5.3.2 Dimensionnement du champ PV

La puissance crête nécessaire pour couvrir 50% de la charge des édifices publics est de 280 kW. Ainsi Le champ PV doit comprendre 1090 modules de 250Wc soit une surface de 1865,5 m². La production d'électricité moyenne journalière dans le domaine photovoltaïque est de 0,81 MWh/jour, soit 355 MWh/an par an.

5.3.3 Dimensionnement de l'onduleur

Le système nécessitera 50 onduleurs hybrides de 4 kW. La puissance maximale étant inchangée, nous conserverons la même taille d'onduleur dans le reste des solutions.

5.3.4 Dimensionnement du stockage

Pour assurer une couverture permanente, deux jours d'autonomie le système a besoin 42 batteries de 200 Ah.

5.3.5 Dimensionnement du réseau

Rappelez-vous que le système n'est pas autonome. Peut répondre à 50% des besoins énergétiques des édifices publics. Les 50% restants sont couverts par le réseau électrique de 89.5 kW. La moyenne journalière est de 381.8 kWh. Au total, le réseau ne couvre que 50 % des besoins énergétiques des édifices publics. Il est intéressant d'un point de vue technique, économique et environnemental.

5.4 DESCRIPTION DU SYSTEME DU SOLUTION B

La solution B est photovoltaïque + batterie + éolienne + système de réseau. Il couvre 50% de la charge des édifices publics par le PV + batteries et l'éolienne. Le reste sera couvert via le réseau d'électricité publique.

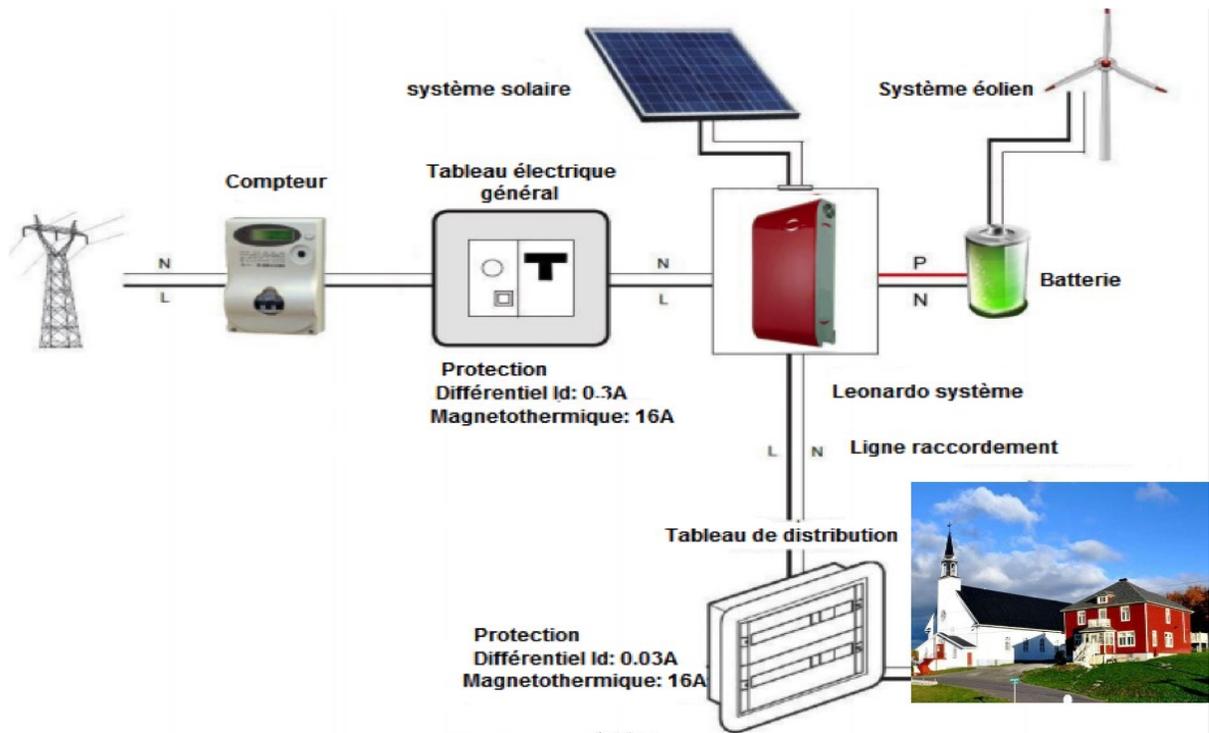


Figure 55 Représentation du système : PV +éolienne batteries + réseau

Dans cette partie, le logiciel HOMER Pro est utilisé pour effectuer le travail, ce qui nous permet de régler et d'optimiser notre système hybride en même temps. Le système se compose d'un champ photovoltaïque, d'une batterie de stockage et d'une production d'énergie éolienne. Il se connecte au réseau comme il est illustré à la Figure 54.

5.4.1 Dimensionnement du champ PV

La puissance de crête nécessaire pour couvrir entièrement la charge des édifices publics est de 179 kWc. Par conséquent, le champ PV doit être composé de 1046 modules de 250Wc chacun, soit une surface de 1802 m². La production d'électricité moyenne journalière dans le domaine photovoltaïque est de 0,986 MWh/jour. La production annuelle est de 358,4 MWh/an.

5.4.2 Dimensionnement du stockage

Dans notre zone d'étude, les dépôts solaires sont abondants (4.96 kWh/m²/jour) donc deux jours d'autonomie suffisent. Alors, 43 batteries de 200 Ah satisferont le système.

5.4.3 Dimensionnement de l'éolienne

La sélection de l'éolienne appropriée est basée sur les caractéristiques du site telles que la vitesse et la direction du vent. Après avoir étudié la distribution de Weibull dans le chapitre 1, les éoliennes avec des vitesses de démarrage inférieures ou égales à 2,5 m/s conviendraient à notre site. Pour répondre à la demande énergétique, 4 éoliennes de ce type seront utilisées. La puissance nominale des éoliennes utilisées est de 500 W à une vitesse de vent de 7 m/s. Par conséquent, la production d'électricité quotidienne moyenne est de 4,8 kWh et la production d'électricité moyenne annuelle est de 1,75 MWh annuel.

5.4.4 Dimensionnement du réseau

Le réseau couvre 50% des besoins énergétiques quotidiens des édifices publics, la consommation d'électricité maximale est de 53 kW. La quantité d'énergie quotidienne moyenne est de 152,96 kWh, ou de 55,83 MWh/an annuel.

5.4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude technique de tous les paramètres est réalisée et deux systèmes sont proposés. Pour les solutions éoliennes, des alternatives peuvent être proposées afin d'éviter les obstacles autour des édifices publics. Le système nécessitera des composants de protection pour son bon fonctionnement, tels que disjoncteurs, fusibles et protection contre la foudre.

5.5 ETUDE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

5.5.1 SOLUTION A

5.5.1.1 Estimation des coûts

La solution A avec une couverture avec générateur photovoltaïque nécessite un coût d'investissement de 384400 CAD (tableau 2) et frais de câblage supplémentaires, de l'armoire à coffret et autres de 1100 CAD. Par conséquent, notre coût total final est de 385500 CAD. Ce coût élevé du système est en partie dû aux représentants du champ PV et du parc de batteries représentaient respectivement 59 % et 18 % du coût total de l'investissement

Tableau 2 Coûts d'investissements de la solution A

Composants	Capital (CAD)	Replacement(CAD)	Maintenance (CAD)	Récupération(CAD)	Total (CAD)
Champ PV	303000	0	90000	0	393000
Batterie	322700	17000	400	3900	344000
Convertisseur	18700	54111	18800	30400	122000
Système	173400	54100	122900	34000	384400

Le champ PV représente plus de la moitié des coûts d'investissement à 61%, suivi par les batteries et l'onduleur.

5.5.1.2 Variabilité et rentabilité financière

Le taux de rentabilité interne (TRI) du projet est égal à 12,1%. Il y a un retour sur investissement après 15 ans. À partir de Ce jour-là, l'énergie générée par le système sera « gratuite » et le projet permettra d'économiser 38500 CAD par an. La durée de vie de l'installation est 25 ans, donc 15 ans de retour sur investissement, on peut dire que le projet

est faisable. La valeur actualisée nette VAN Valeur positive de 136000 CAD, représentant un gain monétaire 25 ans de production montrent encore que le projet est réalisable.

5.5.2 SOLUTION B

5.5.2.1 Estimation des coûts

Pour la solution B, un coût d'investissement de 493800 CAD (tableau 3) et des frais supplémentaires : câblage, armoires, etc. Le coût total est de 497000 CAD.

Tableau 3 Coûts d'investissements de la solution B

Composants	Capital (CAD)	Remplacement(CAD)	Maintenance (CAD)	Récupération(CAD)	Total (CAD)
Champ PV	395000	0	6500	0	401500
Eolien	39000	39000	45000	700	123700
Batterie	24500	17800	630	3800	46700
Onduleur	186000	15000	7000	8000	126000
Système	244300	92500	128000	29000	493800

Le système économisera annuellement pendant la période de d'investissement 25000 CAD. La valeur actuelle nette (VAN) positive de 298000 CAD représente des revenus de fonds générés pendant la durée de vie du projet.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail met en œuvre des solutions d'énergie renouvelable (Solaire PV et/ou Éolien) pour produire de l'électricité pour l'alimentation des édifices publics. Compte tenu de la forte demande énergétique et des factures énergétiques, l'intégration ou la connexion de systèmes autonomes d'énergie renouvelable au réseau sera une alternative à la réduction des factures énergétiques. Ces systèmes contribuent à protéger l'environnement des émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile.

Nous avons réalisé des études techniques, économiques et environnementales sur différentes solutions suggérées. Cette étude a été menée avec l'outil HOMER dans les scénarios hors réseau et connectés au réseau pendant une période de 25 ans. Le profil de charge utilisé dans ce travail a été construit à partir du bilan de puissance. Cela indique que les édifices ont une puissance de pic de 179 kW. La consommation moyenne journalière d'électricité est de 568,96 kWh. Les résultats obtenus sont analysés du point de vue des perspectives économiques et environnementales.

Au niveau économique, le coût d'investissement et la proportion des solutions photovoltaïques et réseau est très élevée. Le retour sur investissement est long (11+ ans).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Wind power:** [www.wind power.org](http://www.windpower.org).
- [2] Guy Cuntz. *Eoliennes et aérogénérateurs*. Guide de l'énergie éolienne, Ed: Edisud Technologies douces 1979
- [3] M. Belhadj. Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister, Université Tahri Mohamed -Béchar-, 2008
- [4] A. Mekemeche. Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem 2017
- [5] S. S. Merwan. Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar -Annaba-, 2017.
- [6] A. Khenfer. Etude et conception d'une architecture en vue de la détection de défauts dans une installation photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1 - Setif-, 2015.
- [7] T. Boutaba. Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien. Thèse de Doctorat, Université abbès laghrour -khenchela-, 2018.
- [8] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. Voulgaris. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system. IEEE Transactions on power electronics. Vol 16, pp. 46-54, 2001

[9] R. Khenfer. Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas -Setif-, 2018.

[10] S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder. Etude de la configuration des diodes by-pass sur les modules PV 86, pp. 1632-1640, 2009;

[11] B. Lamri. Analyse énergétique et intégration de la sûreté de fonctionnement dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba-, 2018

[12] K. Kato, H. Koizumi, A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer. in 2015 IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS). 2015. IEEE.

[13] S. Saravanan, R. S. Kumar, A. Prakash, T. Chinnadurai, R. Tiwari, N. Prabakaran, "Photovoltaic array reconfiguration to extract maximum power under partially shaded conditions", in Distributed Energy Resources in Microgrids. 2019, Elsevier. p. 215-241.

[14] W. Meinecke, DLR (Germany), M. Bohn NREL (USA). Solar energy concentrating systems. Applications and technologies.

I. VECHI, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome," Thèse de doctorat, Université du Havre, France, 2005.

[15] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems—Characteristics and comparisons," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1221-1250, 2008/06/01/ 2008.

[16] M. Götz *et al.*, "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371-1390, 2016/01/01/ 2016.

[17] W. Palz *L'électricité Solaire*. Ed: Dunod Unesco, (1981)

- [18] Michel Rodot et Abdelhanine Benallou. *Electricité Solaire au service du développement rural*. Guide de l'Ingénieur, Collection Etudes et filières, (1993).
- [19] R. Khenfer. Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas-Setif-, 2018
- [20] H. Bouzeria. Modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2 -Batna-, 2016.
- [21] Djalab, A. A., Rezaoui, M. M., Mazouz, L., Teta, A., Sabri, N. Robust Method for Diagnosis and Detection of Faults in Photovoltaic Systems Using Artificial Neural Networks. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2020.
- [22] Biomasse <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- [23] H.-J. W. J. Mathur, *Introduction to Wind Energy Systems* (2017).
- [24] <https://canwea.ca/fr/marches-oliens/puissance-installee/>
- [25] B. Sorensen, « *Renewable Energy Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy and Planning Aspects* », Elsevier Academic Press, 2004
- [26] <https://quebecsolar.ca/fr/le-potentiel-photovoltaique-quebecois-un-potentiel-qui-en-surprend-plusieurs/>
- [27] <https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/donnees-et-analyse/donnees-et-analyse-energetiques/faits-saillants-lenergie/faits-lenergie-renouvelable/20080#L7>
- [28] Jean-Paul Blugeon *Produire son électricité : Avec les énergies solaire et éolienne : Principes, exemples de réalisation.*
- [29] <https://selectra.info/energie/guides/environnement/biomasse>

[30] r. e. canada. "Adoption des sources d'énergie renouvelable au Canada – Analyse des marchés de l'énergie." <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/produits-base-energetiques/electricite/rapport/adoption-sources-energie-renouvelable-canada-2017/adoption-sources-denergie-renouvelable-canada-analyse-marches-lenergie-biomasse.html>

[31] <https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/donnees-et-analyse/donnees-et-analyse-energetiques/faits-saillants-lenergie/energie-emissions-gaz-effet-serre-ges/20074#L1>

[32] https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019?fbclid=IwAR13fbFNG1HgUjtX4lyg2zP88xU1fO-pQm6zabY0wMuYhEQ2jmMvPpJ_diQ

[33] Kebir Tchoketch, F.G., Larbes, C., Ilinca, A., Obeidi, T., Tchoketch Kebir, S. – “Study of the Intelligent Behavior of a Maximum Photovoltaic Energy Tracking Fuzzy Controller”, *Energies*, v. 11, no. 12, pp. 3263, 2018

[34] Chen J, Wang Q, Shen WZ, Pang XP, Li SL, Guo XF. Etude d'optimisation structurelle d'une pale d'éolienne composite. *Mater Des* 2013;46:247-55.

[35] A. Chehouri, R. Younes, A. Ilinca, J. Perron – “Review of Performance Optimization Techniques Applied to Wind Turbines”, *Applied Energy*, v.142, pp. 361-388, 2015

[36] Diveux T, Sebastian P, Bernard D, Puiggali J, Grandidier J. Éoliennes à axe horizontal : optimisation par algorithmes génétiques. *Énergie éolienne* 2001;4:151-71.

[37] Jureczko M, Pawlak M, Mezyk A. Optimisation des pales d'éoliennes. *J Mater Process Technol* 2005;167:463–71.

- [38] Hillmer B, Borstelmann T, Schaffarczyk P, Dannenberg L. Conception aérodynamique et structurelle des pales d'éoliennes MultiMW au-delà de 5 MW. J Phys : Conf. Ser. Éditions IOP ; 2007. p. 012002.
- [39] Liao CC, Zhao XL, Xu JZ. Optimisation des couches de pales des éoliennes à l'aide de FAST et de l'algorithme PSO amélioré. Renouveler l'énergie 2012;42:227-33.
- [40] Grasso F. Utilisation de l'optimisation numérique dans la conception de profils aérodynamiques d'éoliennes. J Aircraft 2011;48:248–55.
- [41] Grasso F. Optimisation hybride pour les profils épais d'éoliennes. In : Actes de la 53ème conférence AIAA/JASME/ASCE/AHS/ASC Structures, dynamique des structures et matériaux. Papier AIAA AIAA2012.
- [42] Bizzarrini N, Grasso F, Coiro DP. Algorithmes génétiques dans la conception des profils aérodynamiques des éoliennes. Dans : EWEA, EWEC2011. Bruxelles (Belgique) ; 2011. p.14-7.
- [44] Maki K, Sbragio R, Vlahopoulos N. Conception du système d'une éolienne en utilisant une approche d'optimisation multi-niveaux. Renouveler l'énergie 2012;43:101-10.
- [45] Bak C. Conception aérodynamique des rotors d'éoliennes. Dans : Brønsted P, Nijssen R, éditeurs. Avancées dans la conception et les matériaux des pales d'éoliennes, Woodhead Publishing Limited ; 2013, ISBN : 978-1-84569-580-4.
- [46] Abbas, T., Issa, M., Ilinca, A. – « Biomass Cogeneration Technologies: A Review », Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 10 (1), pp. 1-15, 2020
- [47] H Ibrahim, A Ilinca, J Perron « Energy storage systems—characteristics and comparisons,» Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (5), 1221-1250, 2008

[49] <http://antoine.petiteau.pagesperso.orange.fr/EnergiesRenouvelables/Solaire.html>

[50] <https://quebecsolar.ca/fr/le-potentiel-photovoltaique-quebecois-un-potentiel-qui-en-surprend-plusieurs/?fbclid=IwAR1FUZ1k4pzi-zrLXNi7C-JfoYIEmZdD-KbB2h19LCtdIM08-ofIRppHqxQ>