

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا للعلوم التطبيقية
- تلمسان -

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :

SEBAA Mohammed Reda
BENAMMAR Mohammed Youcef

Thème

**Etude de faisabilité et dimensionnement
d'un système hybride à base d'énergies
renouvelables**

Soutenu publiquement, le 13/07/2021, devant le jury composé de :

Dr ABDI SIDI Med EL Amine	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Dr BOUKLI HACENE Fouad	MCA	ESSA. Tlemcen	Encadrant
Dr KERBOUA Abdelfettah	MCB	ESSA. Tlemcen	Co-Encadrant
Pr TAHOUR Ahmed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Dr CHEMIDI Abdelkrim	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2
Pr MALIKI Samir	Professeur	Université de Tlemcen	Invité
Pr Luis FROLEN	Professeur	IPB. Portugal	Invité

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier le bon Dieu, tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions sincèrement Monsieur Fouad Boukli Hacene et Monsieur Kerboua Abdelfatah ; respectivement Encadreur et Co-Encadreur de ce travail ; qui se sont toujours montrés à notre écoute et ont toujours été très disponibles tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour toute l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils nous ont consacré.

Nous tenons également à exprimer nos plus vifs remerciements aux membres du jury : Mr ABDI Sidi Med El Amine pour l'honneur qu'il nous fera de bien vouloir présider ce jury. Mr TAHOUR Ahmed et Mr CHEMIDI Abdelkarim qui ont accepté d'examiner notre travail. Ainsi que nos deux invités Mr MALIKI Samir et Mr FROLEN Luis.

Merci à l'ensemble des enseignants du département électrotechnique qui ont veillé à notre formation durant notre parcours universitaire.

Dédicaces

A ma très chère mère,

Nul ne saurait exprimer ma joie et ma reconnaissance de tout ce que tu as fait pour que je devienne ce que je suis aujourd'hui, merci d'avoir été ma raison d'être, ma lumière et ma force.

A mon très cher père,

Tu as toujours été à mes coté pour me soutenir et m'encourager. Que ce travaille te traduise ma gratitude et mon affection.

A très chère tante Tsouria,

Tu es ma deuxième maman, celle à qui je me confie toujours. Je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance et j'espère que ta bénédiction m'accompagnera toujours.

A ma très chère sœur Meriem et mon très cher frère Djamel,

Puisse dieux vous donner santé, bonheur, courage et beaucoup de réussites.

A mon cher binôme Reda,

Pour ton dur travail effectué dans de cette thèse ainsi que dans l'ensemble des travaux que nous avons effectué auparavant.

Youcef

Dédicaces

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon défunt père et ma très chère mère pour tous leurs sacrifices
et leur soutien moral durant mes études ;*

*Que cette réussite soit pour eux le témoignage de ma profonde affection et ma reconnaissance
éternelle ;*

A ma petite famille, mes frères et sœurs,

Puisse dieux vous bénir et vous protéger

A mon cher binôme Youcef

*Je te considère comme mon frère, merci de partager ce travail avec moi ainsi que tout le soutien
que tu m'as donné*

Reda

Résumé

Les systèmes hybrides basés sur l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie éolienne constituent des sources d'énergie prometteuses et sont économiquement fiables et réalisables pour une utilisation actuelle et future, compte tenu de l'augmentation de la demande d'énergie et de l'épuisement des sources conventionnelles. Cependant, ces systèmes impliquent généralement un surdimensionnement et des exigences considérables en matière de stockage d'énergie, ce qui entraîne des surcoûts relativement élevés. D'autre part, la complémentarité du potentiel éolien et solaire d'une zone donnée peut considérablement réduire la capacité de stockage d'énergie et améliorer les performances du système. Dans ce contexte, une méthodologie technico-économique intégrée pour l'évaluation des systèmes électriques hybrides éoliens et photovoltaïques a été développée, visant à la désignation des configurations optimales pour l'alimentation du bloc administratif de la SARL BOUBLENZA situé à Tlemcen.

La contribution de notre travail réside dans le développement d'un programme de dimensionnement basé sur un algorithme itératif prenant en compte les données horaires météorologiques (éclairage/vent/température) et le profil de la charge pour chaque heure pendant un mois. Le programme développé a permis d'aboutir à la configuration la plus optimale, ainsi que le partage adéquat de puissances entre les ressources afin de satisfaire parfaitement les besoins de la charge.

Mots clés :

Energies renouvelables, Systèmes énergétiques hybrides, Algorithme itératif, Technologies du solaire photovoltaïque et éolien, Dimensionnement, Modélisation.

Abstract

Hybrid systems based on solar photovoltaic (PV) and wind power are promising energy sources and are economically reliable and feasible for current and future use, bearing in mind the increasing demand of energy and the depletion of conventional sources. These systems generally involve over-sizing and considerable energy storage requirements, resulting in relatively high additional costs. However, the complementarity of wind and solar potential in a given area can significantly reduce energy storage capacity and improve system performance. In this context, an integrated techno-economic methodology for the evaluation of wind and photovoltaic hybrid electric systems was developed, aiming at the designation of the optimal configurations for the supply of the administrative bloc of "SARL BOUBLENZA" located in TLEMEN.

The contribution of our work is to develop of a sizing program based on an iterative algorithm taking into account the hourly meteorological data (solar irradiation / wind speed / temperature) and the load profile for each hour during a month. The program developed made it possible to achieve the most optimal configuration, as well as the adequate participation of each resources in order to perfectly meet electrical needs of the load.

Keywords:

Renewable energies, Solar photovoltaic and wind technologies, Hybrid energy systems, Sizing, Modeling, Iterative algorithm.

ملخص

تعد الأنظمة الهجينة القائمة على الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح مصادر طاقة واعدة وموثوقة اقتصاديًا ومجدية للاستخدام الحالي والمستقبلي، مع مراعاة الطلب المتزايد على الطاقة واستنفاد المصادر التقليدية. تتضمن هذه الأنظمة عمومًا متطلبات تخزين طاقة كبيرة الحجم وإفراط في التحجيم، مما يؤدي إلى تكاليف إضافية عالية نسبيًا. ومع ذلك، فإن تكامل طاقة الرياح والطاقة الشمسية في منطقة معينة يمكن أن يقلل بشكل كبير من سعة تخزين الطاقة ويحسن أداء النظام. في هذا السياق، تم تطوير برنامج عددي ذو تقنية اقتصادية متكاملة لتقييم الأنظمة الكهربائية الهجينة للرياح والطاقة الكهروضوئية، بهدف تحديد مشاركة مثلى لكل صنف من مكونات النظام لتزويد الكتلة الإدارية لمؤسسة "بولنزة" الواقعة في تلمسان.

تتمثل مساهمة هذا العمل في تطوير برنامج تحجيم يعتمد على خوارزمية تكرارية مع مراعاة بيانات الأرصاد الجوية لكل ساعة (الإشعاع الشمسي / سرعة الرياح / درجة الحرارة) وملف تعريف الحمولة لكل ساعة خلال شهر. مكن البرنامج الذي تم تطويره من تحقيق التكوين الأمثل للنظام الهجين، فضلاً عن المشاركة المناسبة لكل مورد من موارد الطاقة المتجددة من أجل تلبية الاحتياجات الكهربائية للحمولة بشكل مثالي.

الكلمات المفتاحية

الطاقات المتجددة، تكنولوجيا الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، أنظمة الطاقة الهجينة، التحجيم، ضبط النموذج الرياضي، الخوارزمية التكرارية

Table des matières

Introduction générale.....	18
CHAPITRE 01 : Généralités sur les systèmes énergétiques hybrides	20
1.1 Introduction.....	21
1.2 Les systèmes énergétiques renouvelables (SER).....	21
1.3 Problématique des SEH.....	22
1.4 Les systèmes énergétiques hybrides (SEH).....	23
1.4.1 Générateur photovoltaïque.....	24
1.4.2 Générateur éolien	25
1.4.3 Dispositif de stockage.....	27
1.5 Source d'énergie classique - Générateur diesel.....	28
1.6 Composants auxiliaires	29
1.6.1 Les systèmes de supervision.....	29
1.6.2 Les convertisseurs.....	29
1.6.3 Les charges	30
1.7 Architectures des systèmes énergétiques hybrides.....	30
1.7.1 Architecture en bus continu (CC).....	30
1.7.2 Architecture en bus alternatif (CA)	31
1.7.3 Architecture en bus (CA/CC).....	32
1.8 Différentes configurations des SEH.....	34
1.8.1 PV-Batterie.....	34
1.8.2 Eolienne - Batterie	35
1.8.3 PV-Eolienne	35
1.8.4 PV - Générateur Diesel.....	36
1.8.5 Eolien - Diesel.....	36
1.8.6 PV-Eolienne-Générateur Diesel	37
1.9 Avantages et inconvénients des SEH.....	37
1.10 Conclusion	39
CHAPITRE 02 : Nouvelles technologies du solaire photovoltaïque et éolien.....	40
2.1 Introduction.....	41
2.2 Nouvelles technologies du solaire photovoltaïque.....	41
2.2.1 Cellules half-cut.....	43
2.2.2 Cellules solaires bifaciales.....	46
2.2.3 Le module photovoltaïque bi-verre.....	53

2.2.4	Cellules multi-busbars	55
2.3	Nouvelles technologies des éoliennes :	59
2.3.1	Technologie des éoliennes modernes et défis :	59
2.3.2	Les paramètres en jeu :	61
2.3.3	Technologies des matériaux des pales :	65
2.3.4	L'évolution des éoliennes :	68
2.4	Conclusion :	74
CHAPITRE 03 : Optimisation, modélisation et dimensionnement du SEHR		75
3.1	Introduction	76
3.2	Métriques de l'énergie hybride	77
3.3	Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides	77
3.3.1	Outils logiciels :	78
3.3.2	Techniques conventionnelles :	78
3.3.3	Techniques d'optimisation non conventionnelles :	79
3.3.4	Autres techniques :	79
3.4	Les techniques et algorithmes les plus couramment utilisées dans les SEHR :	79
3.5	Modélisation des composants du SEHR :	81
3.5.1	Modélisation du générateur photovoltaïque :	81
3.5.2	Modélisation du générateur éolien :	85
3.5.3	Modélisation du système de stockage :	87
3.5.4	Choix du convertisseur :	90
3.6	Configuration du SEHR adoptée pour la SARL BOUBLENZA :	91
3.6.1	Présentation du site :	92
3.6.2	Architecture de la configuration proposée :	93
3.6.3	Problématique et algorithme de dimensionnement :	94
3.7	Intérêt économique :	97
3.7.1	Coût d'achat :	97
3.7.2	Coût de maintenance :	98
3.7.3	Coût de renouvellement :	98
3.7.4	Le coût total :	98
3.8	Conclusion :	99
CHAPITRE 04 : Résultats de simulation et discussion		100
4.1	Introduction :	101
4.2	Potentiel Eolien :	102
4.3	Potentiel solaire :	104

4.4	Profil de la charge :.....	107
4.5	Résultat obtenus et discussion :	108
4.5.1	Configurations choisies :	109
4.5.2	Répartition des puissances par les générateurs :	115
4.5.3	Calcul de l'autonomie du SEHR :	118
4.6	Intérêt économique :	120
4.7	Comparaison avec les travaux précédents :	121
4.8	Conclusion :	122
	Conclusions Générales.....	123
	Perspectives.....	124
	Bibliographie.....	125

Liste des figures

Figure 1.1 : Exemple d'un SEHR	22
Figure 1.2 : Système hybride PV-Eolien-Batterie-GD.....	23
Figure 1.3 : SEH à base de ressources conventionnelles/non conventionnelles	24
Figure 1.4 : Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque en électricité.	25
Figure 1.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	26
Figure 1.6 : Principaux organes du système de conversion éolien.	26
Figure 1.7 : Schéma de principe d'une batterie Lithium-Ion.....	28
Figure 1.8 : Générateur diesel.....	29
Figure 1.9 : Architecture d'un SEH en bus CC.....	30
Figure 1.10 : Architecture d'un SEH en bus CA.....	31
Figure 1.11 : Architecture d'un SEH en bus CA/CC.....	33
Figure 1.12 : SEH PV/Batterie.....	34
Figure 1.13 : SEH Eolien/Batterie.	35
Figure 1.14 : SEH Eolien/PV avec et sans système de stockage.....	35
Figure 1.15 : SEH PV/Diesel avec et sans stockage.	36
Figure 1.16 : SEH Eolien/Diesel.	36
Figure 1.17 : SEH PV/Eolien/Diesel avec et sans stockage.....	37
Figure 2.1 : Evolution chronologique de l'efficacité énergétique des cellules photovoltaïques	42
Figure 2.2 : Comparaison des pertes joules entre une demi-cellule et une cellule complète.....	43
Figure 2.3 : Panneau standard à 60 cellules vs 120 cellules demi-coupées.....	44
Figure 2.4 : Comparatif des caractéristiques I-V d'un module à base de cellules half-cut et d'un module à base de cellules ordinaires	45
Figure 2.5 : Principe de fonctionnement du panneau solaire bifacial	46
Figure 2.6 : Panneau solaire bifacial utilisé comme ombrière	47
Figure 2.7 : Champ de panneaux bifaciaux suspendus	49
Figure 2.8 : Panneau bifacial vertical	49
Figure 2.9 : Moyenne annuelle de la puissance journalière d'une cellule bifaciale.....	50
Figure 2.10 : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule bifaciale pour les deux faces avant et arrière (525W/m ² avant et 367W/m ² arrière)	51
Figure 2.11 : Vue en coupe de cellules solaires en silicium cristallin bifaciales de type n et de type p standard.	51
Figure 2.12 : Comparaison entre un module verre-film et un module bi-verre	53
Figure 2.13 : Performances du module bi-verre	54
Figure 2.14 : Cellule Busbar	55
Figure 2.15 : Connexion des fils au cœur de la cellule	56
Figure 2.16 : Rayons descendant sur un onglet de busbars (à gauche) et sur un fil rond (à droite). ...	57
Figure 2.17 : Comparatif entre une cellule 5BB et 9BB.....	58
Figure 2.18 : Eoliennes à axe horizontal et vertical.....	61
Figure 2.19 : Champ éolien Onshore.....	63
Figure 2.20 : Structure interne de la pale d'une éolienne.....	66
Figure 2.21 : Moule pour une pale éolienne Siemens en fibres de verre de 75 m	67
Figure 2.22 : Ferme éolienne off-shore.....	68

Figure 2.23 : Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore (©Connaissance des Énergies).....	69
Figure 2.24 : éolienne flottante farshore	70
Figure 2.25 : L'éolienne sans pales : un moyen alternatif et innovant d'exploiter l'énergie du vent. ...	72
Figure 2.26 : Les composants de l'éolienne Wind Belt	73
Figure 2.27 : Eolienne volante (Aéroportée).....	74
Figure 3.1 : Indicateurs de performance pour les systèmes énergétiques hybrides	77
Figure 3.2 : Diagramme regroupant différentes méthodes d'optimisation.....	78
Figure 3.3: Contribution des algorithmes et méthodes d'optimisation les plus communément utilisés	80
Figure 3.4: Fréquence d'utilisation des techniques dans la littérature publiée au cours des 10 dernières années.....	80
Figure 3.5 : Modèle standard d'une cellule photovoltaïque	82
Figure 3.6 : Zytech solar PV ZT300P	84
Figure 3.7 : Eolienne SUN-800 à 6 pales.....	86
Figure 3.8 : Batterie Lithium ion Facility Solar LPBG-48250.....	90
Figure 3.9 : Convertisseur Facility solar IVPM10048.....	91
Figure 3.10 : Situation géographique de la SARL BOUBLENZA.....	92
Figure 3.11 : Capture satellitaire de la SARL BOUBLENZA.....	93
Figure 3.12 : Architecture du SEHR choisi	93
Figure 3.13 : Organigramme de dimensionnement du SEHR.....	95
Figure 4.1 : Anémomètre avec girouette	102
Figure 4.2 : Profil de la vitesse du vent	104
Figure 4.3 : Pyromètre incliné à 30° SUD	105
Figure 4.4 : Profil du rayonnement solaire.....	106
Figure 4.5 : Profil de la température	107
Figure 4.6 : Profil de la demande de la charge	108
Figure 4.7 : Variation de la capacité du stockage en fonction de la puissance éolienne à installer ...	109
Figure 4.8 : Variation de la capacité de stockage en fonction de la puissance éolienne avec différentes combinaisons PV	110
Figure 4.9 : Variation de la capacité du stockage en fonction de la puissance éolienne avec 33 PV cas de configuration optimale 1	111
Figure 4.10 : Influence de la puissance éolienne sur le coût du SEH	112
Figure 4.11 : Capacité de stockage en fonction de la puissance PV.....	113
Figure 4.12 : SOC pour les deux configurations « optimale 1 » et « optimale 2 ».....	114
Figure 4.13 : Zoom sur le SOC de la configuration « optimale 2 ».....	115
Figure 4.14 : Profil de puissance des différents générateurs et la charge config « optimale 1 »	116
Figure 4.15 : Profil de puissance des différents générateurs et la charge config « optimale 2 »	116
Figure 4.16 : Contribution de chaque composant du SEHR (configuration optimale 1).....	117
Figure 4.17 : Contribution de chaque composant du SEHR (configuration optimale 2).....	117
Figure 4.18 : Evolution de la puissance de la charge et celle du SEH adopté	119

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Niveau de maturité des nouvelles technologies PV	43
Tableau 2.2 : Avantages du bifacial par rapport au monofacial	52
Tableau 2.3 : Comparaison entre HAWT et VAWT.....	59
Tableau 2.4 : Principales caractéristiques du système de contrôle de puissance	62
Tableau 2.5 : Exemples de modèles de turbines éoliennes impliquant des pales en matériaux composites	67
Tableau 3.1 : Caractéristiques du module ZT300P.....	84
Tableau 3.2 : Caractéristiques de l'éolienne SUN-800	86
Tableau 3.3 : Eolienne SUN-800 à 6 pales.....	89
Tableau 3.4 : Caractéristiques du convertisseur Felicitysolar IVPM10048	90
Tableau 4.1 : Mesures des vitesses du vent (m/s)	103
Tableau 4.2 : Mesures de l'éclairement solaire (W/m ²).....	105
Tableau 4.3 : Mesures de la charge (kW)	107
Tableau 4.4 : Mesures de la consommation de la charge pour le jour le plus défavorable	118
Tableau 4.5 : Coût initial / Coût sur 10 ans / Coût sur 25 ans du SEHR pour la configuration optimale 1.....	120
Tableau 4.6 : Coût initial / Coût sur 10 ans / Coût sur 25 ans du SEHR pour la configuration optimale 2	120

Liste des équations

- Eq (3.1) 81
- Eq (3.2) 82
- Eq (3.3) 82
- Eq (3.4) 83
- Eq (3.5) 83
- Eq (3.6) 85
- Eq (3.7) 87
- Eq (3.8) 87
- Eq (3.9) 87
- Eq (3.10) 88
- Eq (3.11) 88
- Eq (3.12) 88
- Eq (3.13) 88
- Eq (3.14) 94
- Eq (3.15) 96
- Eq (3.16) 96
- Eq (3.17) 96
- Eq (3.18) 96
- Eq (3.19) 96
- Eq (3.20) 96
- Eq (3.21) 97
- Eq (3.22) 98
- Eq (3.23) 98
- Eq (3.24) 98
- Eq (3.25) 99

Liste des abréviations

BB	Busbars
BSF	Back surface field
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
CE	Coût de l'énergie
Co2	Dioxyde de carbone
CP	Coefficient de puissance
ER	Energie renouvelable
GA	Genetic algorithm
GD	Groupe diesel
GES	Gaz à effet de serre
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HAWT	Horizontal axis wind turbine
HJT	Heterojunction solar cell technology
ITRPV	International Technology Roadmap for Photovoltaics
LCOE	Levelized cost of energy
PERC	Passivated emitter and rear cells
PIB	Produit intérieur brut
PSO	Particle swarm optimization
PV	Photovoltaïque
SCE	Système de conversion éolien
SEH	Système énergétique hybride
SEHR	Système énergétique hybride renouvelable
SER	Système énergétique renouvelable
VAWT	Vertical axis wind turbine

Nomenclature

I_0	Le courant de saturation de la diode (A)
Δt	Pas de simulation
η	Rendement instantané du module photovoltaïque
η_{bat}	Rendement de la batterie
η_{inv}	Rendement de l'onduleur
η_r	Rendement de référence du module photovoltaïque
γ	Coefficient de température
Ca	Coût d'achat
Cm	Coût de maintenance
Cr	Coût de renouvellement
Ct	Coût total
M	Le coût de maintenance
EDC_{max}	Limite supérieure de chargement
EDC_{min}	Limite inférieure de déchargement
EDC_t	Etat de charge instantanée de la batterie
G	Irradiation globale
K	Nombre de renouvellement
N_{pv}	Nombre de panneaux photovoltaïques
N_{Eol}	Nombre d'éoliennes
N_{Bat}	Nombre de batteries
P_{eol}	Puissance produite par l'éolienne
P_{Neol}	Puissance nominale éolienne
P_{ch}	Puissance de la charge
P_{pv}	Puissance produite par un seul module photovoltaïque
P_{pvt}	Puissance totale produite par le générateur photovoltaïque
S	Surface du module photovoltaïque
T	Durée de vie du système
T_0	La température standard
T_a	Température ambiante
T_c	Température du module photovoltaïque

V	Vitesse instantanée du vent
V_c	Vitesse de coupure de l'éolienne
V_d	Vitesse de démarrage de l'éolienne
V_n	Vitesse nominale de l'éolienne
V	La tension de la cellule (V),
q	La charge électronique
n	La constante d'idéalité de la diode
k	La constante de Boltzmann
T_{ck}	La température de la cellule
I	Le courant débité par la cellule
B_{rc}	Capacité de batterie requise
E_c	La charge en Watt-heure
D_s	Les jours d'autonomie de la batterie
DOD_{max}	Profondeur maximale de décharge de la batterie
η_t	Le facteur de correction de la température
E_b	Les quantités de charge des batteries
E_{GA}	L'énergie totale générée par la source d'énergie renouvelable
σ	Le taux d'autodécharge de la batterie
$E_{b_{min}}$	La quantité de charge minimale de la batterie
$E_{b_{max}}$	La quantité de charge maximale de la batterie
E_{pr}	L'énergie totale produite par les générateurs du système hybride
Q_{max}	Capacité maximale des batteries
P_{SER}	Puissance générer par le système énergétique renouvelable
η_{cc}	Rendement du régulateur de charge

Introduction générale

Les pressions sur le système énergétique mondial sont sans précédent. La demande en énergie est stimulée par une population croissante et une industrialisation frappante. Cependant les ressources primaires de l'énergie du monde dépendent toujours des combustibles fossiles et concentrent ainsi massivement les gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui ont déjà commencé à perturber de façon significative le climat mondial. Les émissions de carbone dues à l'activité humaine causée essentiellement par la hausse de la demande en énergie doivent être à "zéro net" d'ici 2050 pour limiter le réchauffement climatique, selon un récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental de l'ONU. C'est dans ce sens que tous les gouvernements du monde se sont engagés à développer des plans d'action pour assurer une plus grande exploitation des sources d'énergie renouvelables.

La libéralisation du marché électrique et une conscience environnementale des acteurs mondiaux sont des leviers au développement des énergies renouvelables. Ces dernières se développent à un rythme rapide dans le monde. Leur insertion dans le mix énergétique pose de nouveaux défis par rapport aux sources d'énergie traditionnelles.

Avec un potentiel abondant encore sous-exploité, le photovoltaïque et l'énergie éolienne sont avantageux sur le plan économique et environnemental. Cependant, leur caractère intermittent diminue leur efficacité énergétique lorsqu'elles sont exploitées individuellement. L'utilisation de systèmes hybrides (multi-sources) combinant ces sources d'énergie renouvelables et les systèmes de stockage classiques, est généralement considérée par tous comme solution d'avenir, à la fois efficiente et fiable. Il est alors nécessaire de repenser la structure des réseaux électriques et des marchés de l'énergie, ainsi que des changements dans les méthodes de gestion de réseau.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail consiste en une étude de faisabilité d'un système énergétique hybride à base d'énergies renouvelables pour l'alimentation du bloc administratif de la SARL BOUBLENZA. Différentes configurations et différents scénarios de configuration sont modélisés, testés et comparés pour analyser l'efficacité et la

robustesse de chaque cas de figure. Une analyse technique et économique complète est réalisée dans le but d'aboutir à une configuration optimale et viable.

Le premier chapitre aborde les systèmes énergétiques hybrides de manière générale, la problématique des systèmes énergétiques, la nécessité de l'hybridation, les configurations les plus répandus des SEH. Ensuite, il est présenté les enjeux, les avantages faisant de ce type de systèmes le meilleur moyen de la transition énergétique.

Dans le second chapitre, nous nous intéressons aux nouvelles technologies du solaire photovoltaïque et éolien. Nous commençons par donner un bref aperçu sur le fonctionnement de chacun des systèmes, puis nous énumérons les technologies les plus récentes, en termes de matériaux utilisés, de gain en puissance, et de nouveautés par rapports aux technologies traditionnelles.

Le troisième chapitre passe en revue un panorama synthétique sur les méthodes de dimensionnement les plus communément utilisés pour les SEH, dans un premier lieu. Il sera ensuite dédié à la modélisation des différents générateurs du SEHR choisi, les convertisseurs et le système de stockage, ainsi que leurs représentations mathématiques utilisées tout au long de ce travail. Ensuite, les modèles adaptés à l'étude seront choisis selon leurs caractéristiques opérationnelles et leur aspect économique. Enfin, une définition et une explication est consacrée à la problématique et le modèle utilisé en présentant l'algorithme de dimensionnement itératif dédié et toutes les entrées qui le régissent.

Dans le quatrième et dernier chapitre nous analyserons en détail le potentiel énergétique solaire et éolien ainsi que le profil de consommation du bloc d'administration de la SARL. Ensuite, nous introduiront les données météorologiques et les paramètres initiales du fonctionnement du programme développé sous la plateforme de programmation Matlab. Enfin, un intérêt économique est établi et les résultats de simulation sont présentés, analysés et discutés afin de montrer la fiabilité de notre travail.

CHAPITRE 01 :
Généralités sur les
systemes
énergétiques
hybrides

1.1 Introduction

L'humanité évolue à un rythme plus rapide avec la croissance de la population et une augmentation du produit intérieur brut (PIB) global. Ce qui entraînera directement à une hausse substantielle de la demande d'énergie électrique [1]. Face à cette augmentation des besoins en consommation d'énergie électrique, les ressources conventionnelles telles que : le pétrole, le gaz naturel et l'uranium seront épuisées dans quelques décennies [2].

Face à cette situation ; l'énergie renouvelable est la solution alternative de la prospérité future, pour un environnement mondial sain. Elle est considérée comme un moyen prometteur pour résoudre certains problèmes de réchauffement climatique et de l'environnement tels que la réduction des émissions du CO₂ et la pollution atmosphérique [3].

Le monde s'oriente progressivement vers une exploitation plus vaste de ressources énergétiques renouvelables pour la production d'électricité à cause de la baisse des coûts d'installation. En effet ; au cours des dernières décennies, la communauté scientifique a manifesté un vif intérêt pour le développement de la part des systèmes d'énergie renouvelables (SER) dans le mix énergétique [4].

Ce chapitre est organisé comme suit : La section 1.2 présente la problématique des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables. La section 1.3 décrit une vue d'ensemble du système énergétique hybride basé sur les énergies renouvelables. La section 1.4 présente les composants d'un SEH. Les sections 1.5 et 1.6 traitent respectivement les architectures de SEH et les défis techniques et non techniques de ces derniers, finalement, les sections 1.7 et 1.8 englobent respectivement les différentes configurations des SEH et leurs avantages et inconvénients.

1.2 Les systèmes énergétiques renouvelables (SER)

Les systèmes énergétiques renouvelables utilisent la conversion d'énergie à partir de ressources énergétiques renouvelables, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique pour produire de l'électricité. Malgré les progrès considérables de la technologie, les SER souffrent considérablement de leurs natures stochastiques inhérentes et des prix élevés de leurs installations [5]. En outre, l'électricité qui peut être produite à partir de ces sources d'énergie varie considérablement selon les endroits. Certaines de ces sources d'énergie, par exemple l'énergie éolienne, ont une variation stochastique, alors que l'énergie photovoltaïque ne peut être extraite du soleil que pendant la journée. La densité d'énergie de ces sources est une autre préoccupation pour leur utilisation afin de fournir de l'électricité dans des endroits où l'espace est limité. Cela conduit à une situation délicate pour

les systèmes d'alimentation autonomes basés sur les énergies renouvelables. Aucune alternative n'est absolue et, par conséquent, un système énergétique hybride renouvelable (SEHR) (voir **Figure 1.1**) (une combinaison de plusieurs ressources) est toujours préférable car il offre une diversité de ressources, une sécurité et une fiabilité énergétique améliorée, une complémentarité du système et un développement durable à long terme [6].

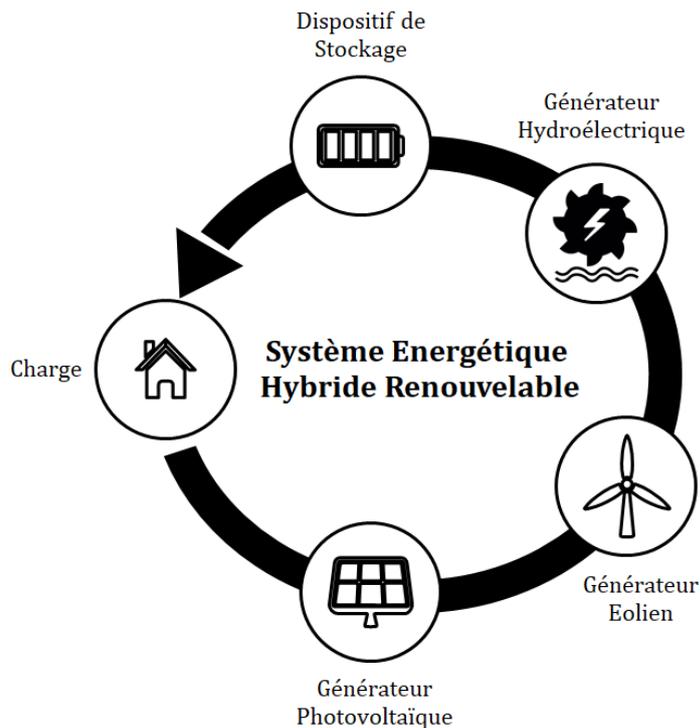


Figure 1.1 : Exemple d'un SEHR [6].

1.3 Problématique des SEH

Des efforts importants ont été réalisés ces dernières années pour introduire des sources renouvelables dans le mix énergétique. A cet effet ; leurs usages dans le réseau électrique nécessitent l'intégration de plusieurs dispositifs notamment ; des plateformes de micro-réseaux et des systèmes de stockage d'énergie. En effet ; le caractère imprévisible des ressources renouvelables les rend individuellement inaptes à fournir une alimentation électrique ininterrompue et fiable à ses utilisateurs. Les difficultés techniques sont dues à des conditions météorologiques incontrôlables qui varient en fonction de la journée ; des saisons ainsi que de la situation géographique [7].

La **figure 1.2** présente la configuration générale d'un système hybride PV-Eolien-Batterie-GD [7]

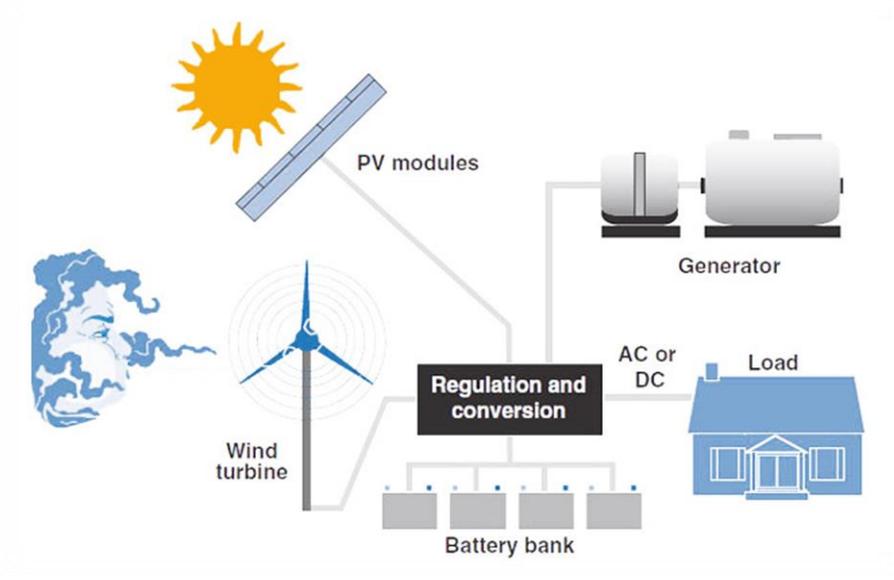


Figure 1.2 : Système hybride PV-Eolien-Batterie-GD [7].

Une hybridation de plusieurs sources d'énergies renouvelables est nécessaire et avantageuse en termes de coût et de fiabilité ; ce qui constitue un système énergétique hybride efficace [8].

Nous pouvons facilement réduire les besoins en combustibles fossiles en choisissant correctement une combinaison de sources d'énergie renouvelables. Étant donné que les ressources basées sur le rayonnement solaire et le vent sont intermittentes. Elles sont souvent combinées à d'autres sources d'énergie telles que les réseaux conventionnels et les générateurs à combustion.

1.4 Les systèmes énergétiques hybrides (SEH)

Les systèmes hybrides comportent plusieurs sources d'énergie électrique et offrent une solution alternative pour les sites autonomes. En effet ; pour une meilleure efficacité énergétique ; ils peuvent être constitués d'une combinaison de ressources renouvelables non-conventionnelles, d'une combinaison de ressources conventionnelles (souvent à base de combustibles fossiles) et d'un dispositif de stockage de l'énergie [9].

Un système électrique hybride est généralement un système de distribution d'énergie basse tension qui peut fonctionner comme un système hors réseau. Le coût de l'énergie (CE), la fiabilité, la qualité de l'énergie, l'accès aux zones isolées ou insulaires, l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables propres extractibles et l'atténuation du changement climatique sont les facteurs clés du déploiement rapide des systèmes de production d'énergie hybride [10]. La **figure 1.3** représente un système énergétique hybride à base de ressources conventionnelles et non

conventionnelles.

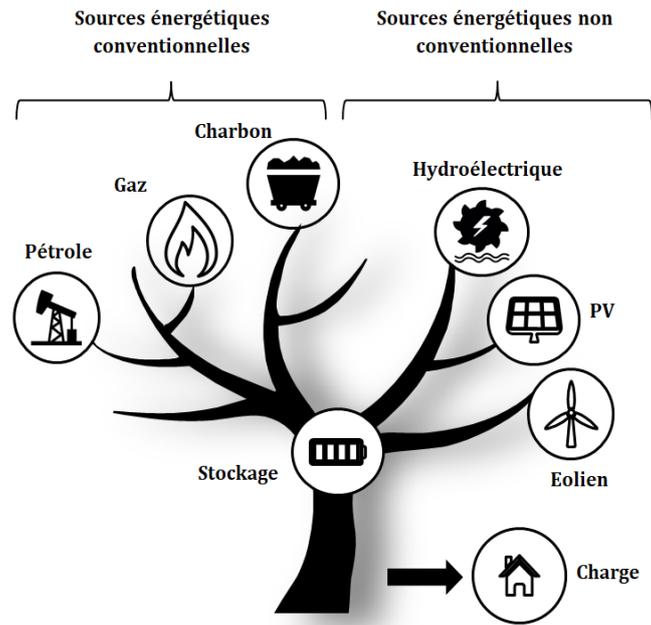


Figure 1.3 : SEH à base de ressources conventionnelles/non conventionnelles [10].

Les systèmes énergétiques hybrides autonomes sont en général constitués de ressources renouvelables les plus compétitives notamment ; le solaire photovoltaïque ; et l'éolien ainsi que les composants à base des sources d'énergie classique notamment le diesel.

1.4.1 Générateur photovoltaïque

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, la diminution de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro

Volta. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité (voir **figure 1.4**) [11].

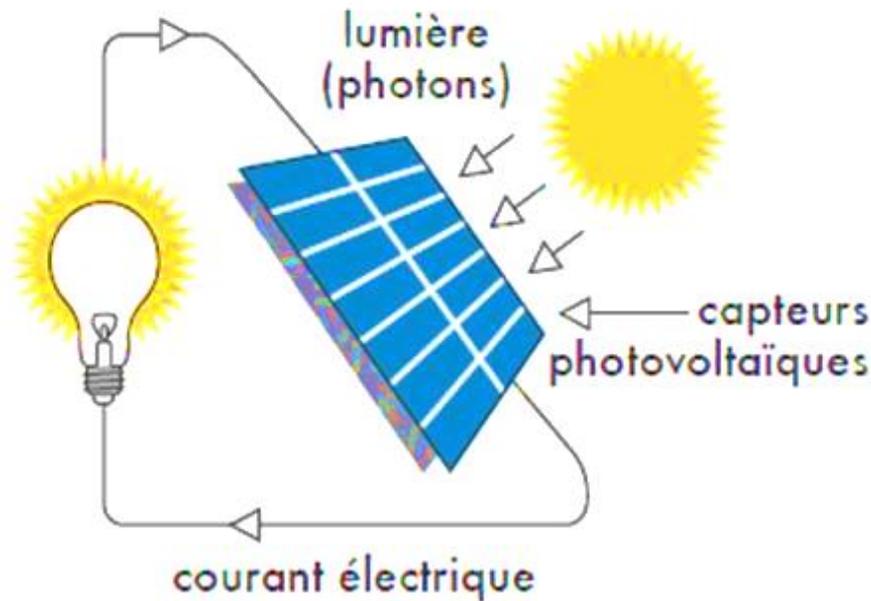


Figure 1.4 : Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque en électricité [11].

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les générateurs photovoltaïques, composés de modules photovoltaïques qui eux même sont composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi facilement utilisable.

1.4.2 Générateur éolien

L'homme utilise l'énergie éolienne depuis des centaines d'années, d'abord pour faire avancer les voiliers, puis pour faire fonctionner les moulins à vent, et plus récemment pour produire de l'électricité à l'aide des éoliennes. Celles-ci convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique pour effectuer des tâches telles que pomper de l'eau ou moulinier du grain.

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (vers le milieu du 19^{ème} siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent

captée par des hélices en énergie mécanique exploitable, [12]. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [13].

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [13]. En effet, le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [13].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (voir la **figure 1.5**) [14].

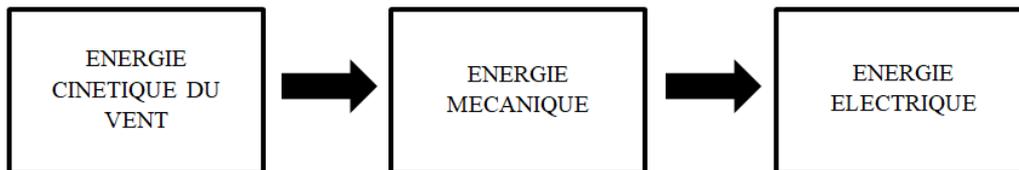


Figure 1.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [14].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la **figure 1.6** [15].

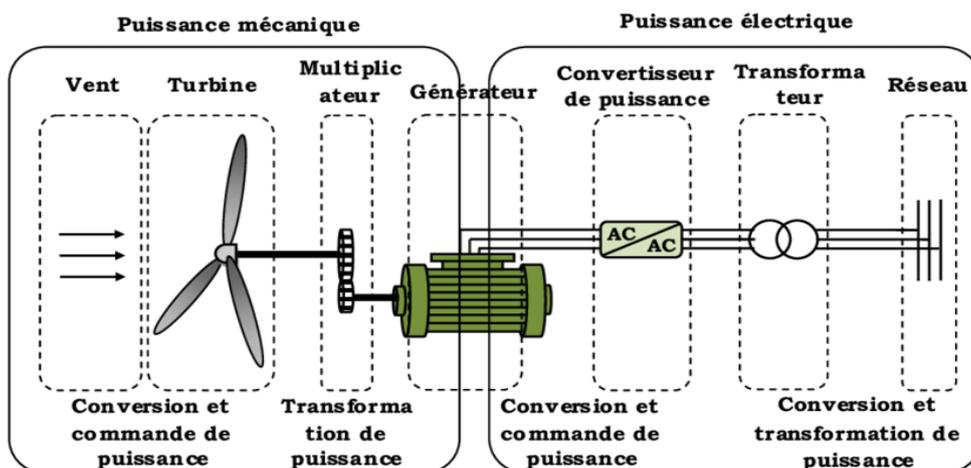


Figure 1.6 : Principaux organes du système de conversion éolien [15].

L'énergie cinétique du vent captée et convertie en énergie mécanique grâce à la rotation des pales. Ces dernières font entrainer l'arbre relié au générateur électrique par un multiplicateur pour atteindre une vitesse proche de sa vitesse nominale.

Le générateur quant à lui convertit l'énergie mécanique qui lui ait fournie en énergie électrique utile dès son passage à travers des convertisseurs de puissance et un transformateur.

1.4.3 Dispositif de stockage

Le stockage de l'énergie est un paramètre primordial pour les systèmes autonomes. Il peut réduire les fluctuations de puissance, améliorer la flexibilité du système et permettre le stockage et la répartition de l'électricité produite par des sources d'énergie renouvelables variables telles que l'éolien et le solaire. Différentes technologies de stockage sont utilisées avec les systèmes énergétiques renouvelables. Elles peuvent être électriques, chimiques ou électrochimiques, mécaniques ou thermiques.

Les premiers systèmes accumulateurs sont des piles telle que la pile Volta, créée en 1801. Il existe aujourd'hui une grande diversité de piles, Le premier accumulateur, ou batterie par abus de langage, est l'accumulateur au plomb, mis au point par Gaston Planté, chimiste français, en 1859.

Dans les années 1900, les batteries de Nickel-Cadium (Ni-Cd) sont développées, et plusieurs dérivés apparaissent comme les batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn), Nickel-Fer (Ni-Fe) et Nickel-Hydrogène (Ni-H₂), entre autres. Cette génération de batteries commercialisées à partir des années 1940 présente un meilleur recyclage et une énergie spécifique supérieure en comparaison des batteries au Plomb [16]. En 1988, la batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH), toujours dérivée de la batterie Ni-Cd, pose les bases des batteries Li-ion actuelles en étant constituée de deux électrodes d'insertions.

Des batteries sont normalement nécessaires pour la plupart des applications autonomes. Dans les systèmes d'énergie renouvelable, les types de batteries couramment utilisés pour le stockage sont les batteries au plomb, les batteries Li-ion et les batteries hybrides à écoulement. Les batteries au plomb sont les plus utilisées en raison de leurs performances et sont présents dans les systèmes photovoltaïques, éoliens et hybrides, pour la traction comme dans les véhicules électriques ou pour les micro-réseaux et les systèmes hors réseau.

Les batteries lithium-ion sont le meilleur choix pour les applications mobiles à haute puissance (ordinateurs portables et téléphones mobiles). Mais les batteries à flux sont plus à même de stocker de l'énergie pendant de plus longues durées que les batteries lithium-ion. Le stockage de l'énergie dans les batteries électrochimiques est la technique la plus répandue pour les petites quantités d'énergie électrique. En fonction du type de batterie (plomb-acide, lithium-ion, nickel-

métal hydrure, etc.), différentes réactions chimiques sont provoquées à partir de l'électricité : il s'agit de la phase de charge de la batterie. Selon la demande, les réactions chimiques inversées produisent ensuite de l'électricité et déchargent le système. Ce principe est illustré dans la **Figure 1.7** [17].

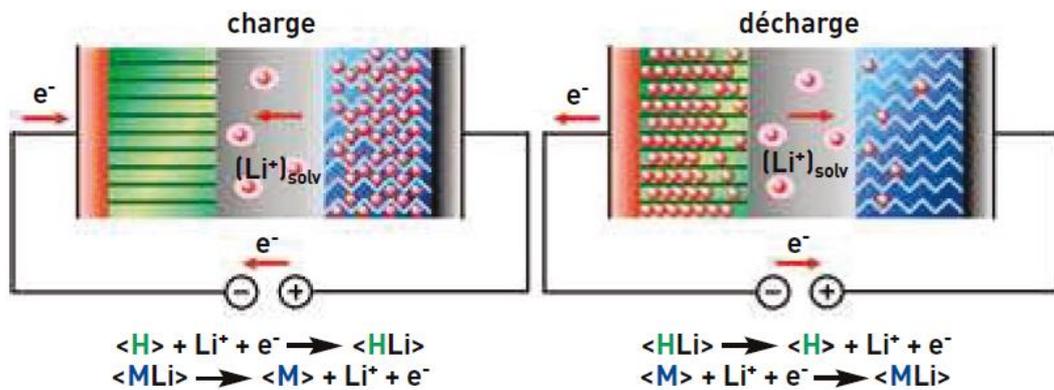


Figure 1.7 : Schéma de principe d'une batterie Lithium-Ion [17].

Les batteries électrochimiques sont souvent destinées à des applications diverses. De puissance relativement faible, elles présentent néanmoins une grande capacité de stockage pour des durées de décharge élevées (jusqu'à plusieurs heures) avec un taux de rendement de 70 à 90%. Ces dispositifs sont utilisés en appoint dans le cas d'une production d'électricité issue des énergies renouvelables, avec des valeurs d'énergie stockée de quelques Wh jusqu'à des dizaines de MWh. L'inconvénient majeur est lié à leur durée de vie, limitée par les dégradations chimiques des réactions et leur coût.

1.5 Source d'énergie classique - Générateur diesel

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui actionne un alternateur. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes.

Les groupes électrogènes sont utilisés dans les sites isolés, soit dans des bâtiments afin de pallier une éventuelle coupure de courant. Dans le deuxième cas, ils sont alors souvent utilisés en parallèle d'une alimentation sans interruption à batterie, la **figure 1.8** représente une illustration du générateur diesel [18].



Figure 1.8 : Générateur diesel [18].

Les GD fonctionnent à partir de tous les carburants. Les plus fréquents sont l'essence, le gasoil, le gaz naturel, le GPL, les bio-carburants et pour les plus puissants le fioul lourd.

1.6 Composants auxiliaires

Les systèmes énergétiques hybrides comportent plusieurs composants auxiliaires entre autres :

1.6.1 Les systèmes de supervision

La plupart des systèmes hybrides comportent des interfaces de commande et de supervision. Les chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de control pour empêcher la surcharge et la décharge profonde des batteries afin de prolonger leur durée de vie. Les réseaux conventionnels utilisent des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs et régler le flux de puissance.

1.6.2 Les convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH :

- Les redresseurs (CA/CC),
- Les onduleurs (CC/CA)
- Les hacheurs (CC/CC).
- Les convertisseurs bidirectionnels de charge et décharge.

1.6.3 Les charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

1.7 Architectures des systèmes énergétiques hybrides

Les différentes sources d'énergie peuvent être interconnectées par un bus CC ou CA ou par les deux bus CC/CA.

1.7.1 Architecture en bus continu (CC)

Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. La charge est alimentée par un onduleur. Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la **figure 1.9**. Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie.

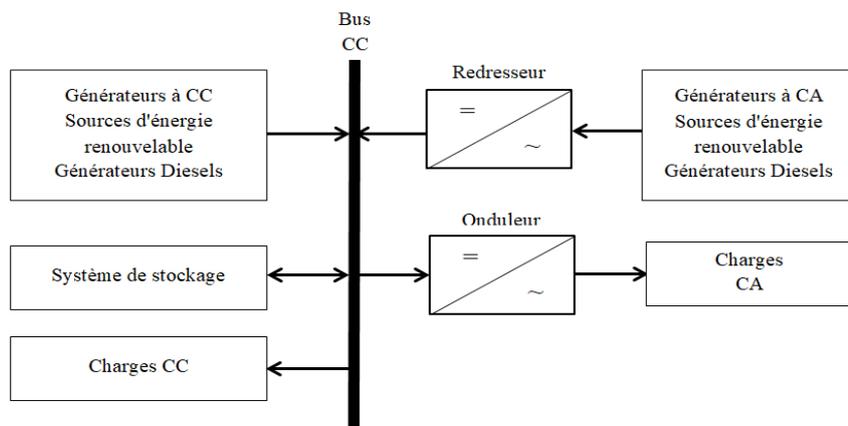


Figure 1.9 : Architecture d'un SEH en bus CC.

- **Avantages**

- Un dimensionnement facile du générateur diesel ;
- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ;
- La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique ;
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur efficace et la fréquence sont convenables.

- **Inconvénients**

- L'onduleur de la charge ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible ;
- La batterie doit avoir une grande capacité de stockage ;
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur ;
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

1.7.2 Architecture en bus alternatif (CA)

Dans cette topologie, tous les composants du SEH sont liés à des charges alternatives à travers un bus CA, comme le montre la **figure 1.10**.

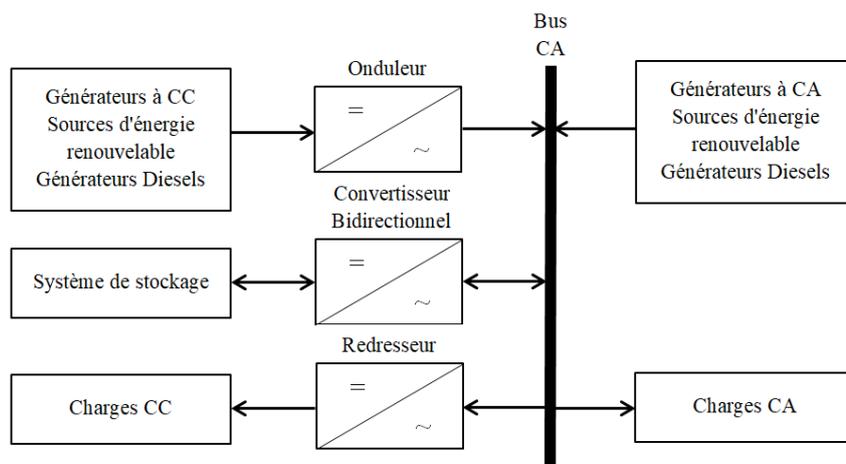


Figure 1.10 : Architecture d'un SEH en bus CA.

Cette configuration offre des performances supérieures à celles de la configuration précédente, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec le générateur de manière à pouvoir alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs.

Par exemple le générateur PV est relié à un onduleur qui lui est connecté au bus CA quant aux sources alternatives elles peuvent être directement liées au bus. Cela offre une certaine flexibilité pour les sources d'énergie qui alimentent la charge. Dans le cas d'une faible charge, tous les générateurs et les systèmes de stockage sont stationnaires, sauf, par exemple, le générateur photovoltaïque pour couvrir la demande de charge. Cependant, en cas de forte demande de charge ou pendant les heures de pointe, les générateurs et les unités de stockage fonctionnent en parallèle pour couvrir la demande de la charge. La réalisation de ce système est relativement compliquée en raison du fonctionnement en parallèle, en synchronisant les tensions de sortie de chaque générateur avec la tension du bus CA.

- **Avantages**

- Un rendement global plus élevé que celui en bus CC,
- Une taille réduite de l'unité de conditionnement d'énergie
- Un niveau élevé de disponibilité énergétique,
- Un fonctionnement optimal du générateur diesel grâce à la réduction de son temps de fonctionnement et, par conséquent, de son coût de maintenance.

- **Inconvénients**

- Cette configuration nécessite un dispositif de synchronisation entre les différentes sources.
- La synchronisation entre les différentes sources exige une tension de même fréquence, amplitude et déphasage.
- Vieillesse prématurée des batteries en raison d'une forte sollicitation.

1.7.3 Architecture en bus (CA/CC)

Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont branchées sur l'autre bus – de courant continu CC. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Ce dernier peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie.

De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la **figure 1.11**.

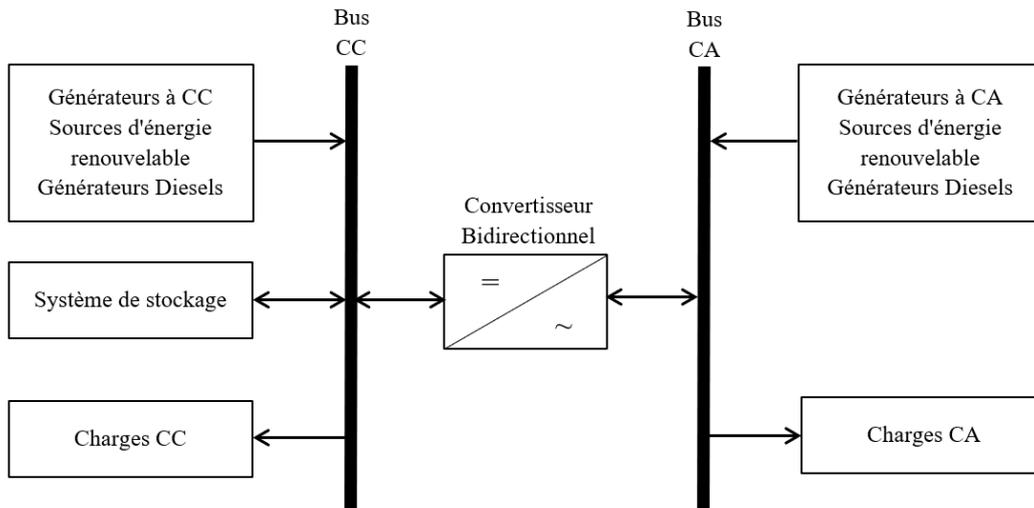


Figure 1.11 : Architecture d'un SEH en bus CA/CC.

- **Avantages**

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel ;
- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride ;
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

- **Inconvénients**

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;
- Le convertisseur électronique bidirectionnel doit fournir une tension sinusoïdale sans harmonique, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible ;
- L'interface de control et de gestion doit être très sophistiqué ;
- Les batteries vieillissent rapidement (sont très sollicitées) ;
- Le bus continu est plus difficile à contrôler.

1.8 Différentes configurations des SEH

Afin d'assurer une perspective maximale des SER et de minimiser leur impact négatif sur le réseau électrique, il est préférable d'utiliser la production des SER localement. Compte tenu de ce fait, les SER sont le plus souvent utilisées comme des ressources énergétiques en mode autonome dans un fonctionnement en îlotage. En général, les SER hybrides (SERH) comprennent plusieurs formes d'énergie renouvelable pour produire de l'électricité. La quasi-totalité des combinaisons de SER disponibles, intègrent les deux sources PV/Eolien et sont beaucoup plus attrayantes dans le monde entier en raison de leur progrès technique, leur fonctionnement économique et leur disponibilité en abondance. Une structure très générale d'un SERH peut consister en n'importe quelle combinaison de ressources d'énergie renouvelable en fonction de la disponibilité des ressources dans une zone individuelle, de la demande de la charge et de tous les coûts associés, y compris les coûts d'installation, d'exploitation et de maintenance.

Les systèmes hybrides fonctionnent le plus souvent en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite sont présentées six configurations de systèmes hybrides avec ou sans stockage :

1.8.1 PV-Batterie

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie (**Figure 1.12**), pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux.

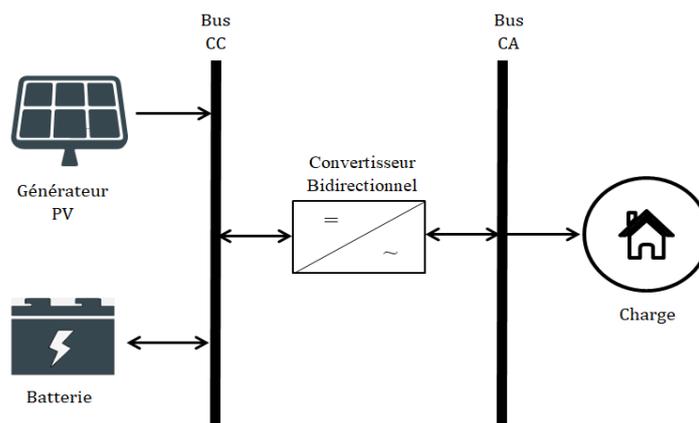


Figure 1.12 : SEH PV/Batterie.

Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation [19]. Les batteries sont utilisées comme dispositif de stockage pour assurer l'autonomie désirée en cas d'absence d'éclairage (durant la nuit, par mauvais temps et/ou passage de nuages).

1.8.2 Eolienne – Batterie

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien (**Figure 1.13**) peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne [20] soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation de la charge lors des périodes de faible vitesse du vent [21].

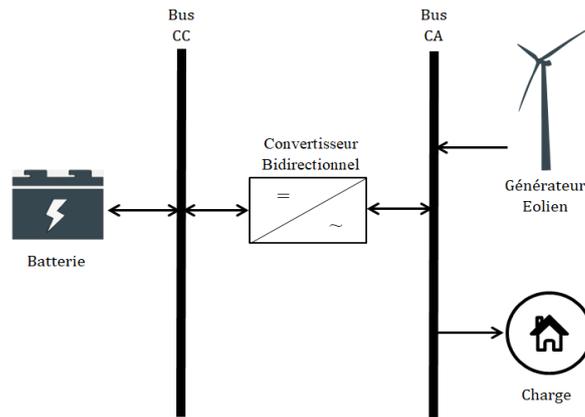


Figure 1.13 : SEH Eolien/Batterie.

1.8.3 PV-Eolienne

Le premier type de système hybride PV-Eolienne sans dispositif de stockage (voir **figure 1.14** droite) s'utilise très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares.

Le deuxième type de système hybride PV-Eolienne avec dispositif de stockage (Batterie) (représenté sur la **figure 1.14** gauche).

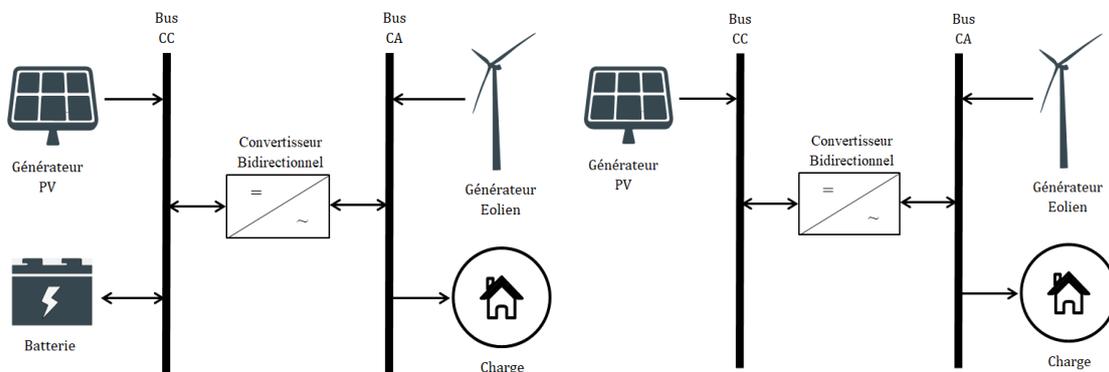


Figure 1.14 : SEH Eolien/PV avec et sans système de stockage.

L'hybridation de ces deux sources avec un système de stockage permet d'améliorer encore plus la fiabilité de l'approvisionnement, d'autre part, ce type de système présente un inconvénient

majeur d'avoir un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une troisième source d'énergie d'origine conventionnelle ou le réseau [22].

1.8.4 PV - Générateur Diesel

Ce type de système hybride (**figure 1.15**) est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une charge, les systèmes autonomes contiennent souvent des batteries [23] comme dispositif de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu, par contre, les moteurs diesel peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. Le plus souvent les consommateurs demandent du courant alternatif.

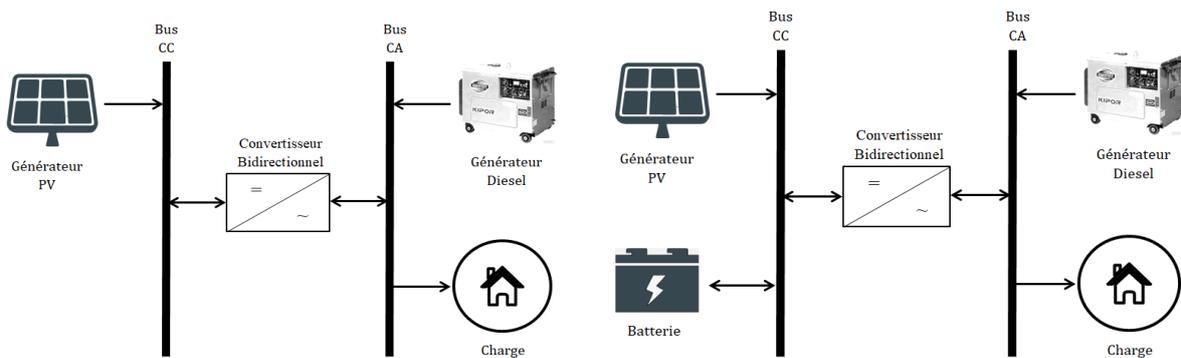


Figure 1.15 : SEH PV/Diesel avec et sans stockage.

1.8.5 Eolien - Diesel

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel (voir **figure 1.16**) se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel.

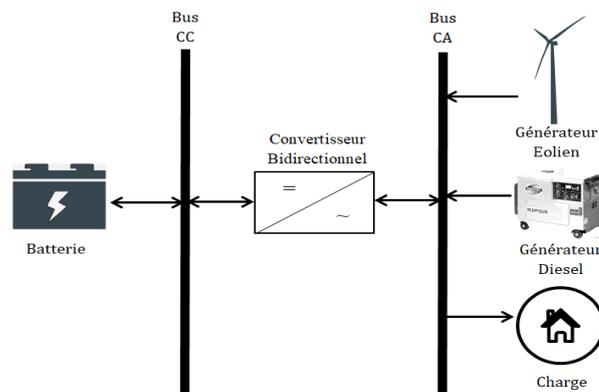


Figure 1.16 : SEH Eolien/Diesel.

De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride. Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer où le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité.

Lorsque le système hybride fonctionne en régime autonome, il comprend souvent un stockage qui peut être idéal, classique par batteries ou innovant par utilisation d'un électrolyseur et d'une pile à combustible avec stockage d'hydrogène [24].

1.8.6 PV-Eolienne-Générateur Diesel

La mise en place d'un tel système (**Figure 1.17**) a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie ainsi que des émissions de GES contrôlées.

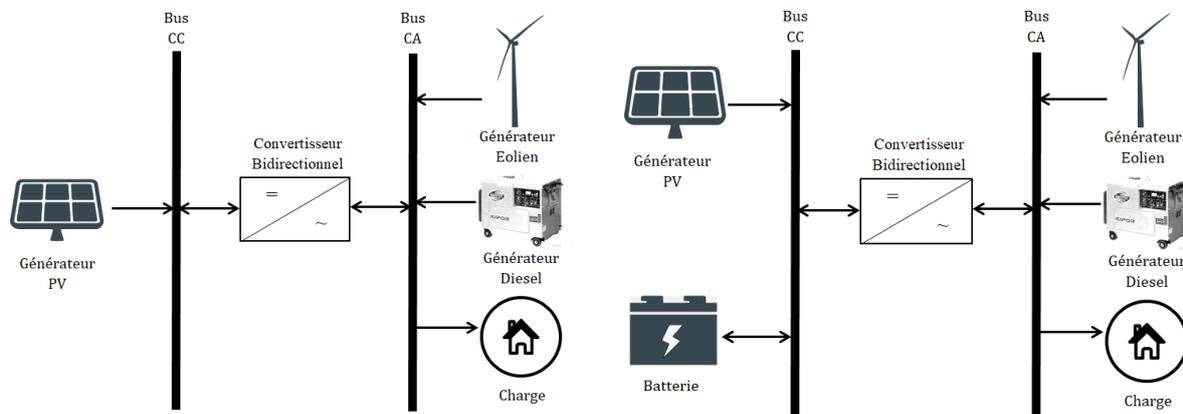


Figure 1.17 : SEH PV/Eolien/Diesel avec et sans stockage.

Des recherches optimisent la configuration du système selon divers critères : probabilité de perte de charge [25], combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions de GES nuisibles [26] auxquels s'ajoute la charge non satisfaite minimale [27]. Ces systèmes alimentent des maisons et des refuges. Ils peuvent être autonomes ou interconnectés avec le système électrique du pays. Le stockage peut être sous forme de batteries, de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible ou d'une combinaison des deux.

1.9 Avantages et inconvénients des SEH

Les systèmes hybrides d'énergie renouvelable (SHER) sont des configurations attrayantes utilisées pour différentes applications et notamment dans les systèmes autonomes de production d'énergie comme l'électrification, le pompage de l'eau et les télécommunications. Les principaux avantages de ces systèmes sont leur simplicité d'utilisation et leur indépendance vis-à-vis d'une source d'énergie, ce qui leur permet d'être productifs de jour comme de nuit. D'un autre côté,

l'inconvénient est qu'il y a différentes sources et unités de stockage, donc le système est plus complexe qu'un système à source unique. Dans ce cas, une gestion de l'énergie est nécessaire pour contrôler le flux d'énergie, donc le système global sera plus complexe et bien sûr plus coûteux.

- **Avantages**

- Réduction de la consommation de carburant grâce à l'ajout de sources d'énergie renouvelables et au fonctionnement efficace des générateurs diesel.
- Coût du cycle de vie inférieur à celui d'un système basé sur une seule source d'énergie qu'elle soit renouvelable ou non.
- Amélioration de la fiabilité du système car les deux systèmes d'alimentation indépendants offrent une complémentarité et éventuellement une plus grande fiabilité globale si le système hybride est correctement entretenu et contrôlé.
- Souplesse de conception : La conception d'un système hybride dépend de la répartition de la charge entre le générateur diesel et la ressource renouvelable. Par exemple, plus la taille du champ PV augmente, plus le temps de fonctionnement du générateur diminue. Cela permet d'économiser du carburant, de réduire la maintenance et de prolonger la durée de vie du générateur, mais le coût initial sera plus élevé que celui d'un système électrique doté d'un champ PV plus petit. Pour un système électrique hybride, la taille du parc de batteries est généralement inférieure à celle d'un système PV autonome conçu pour la même application. Ceci est dû au fait que le générateur sera disponible pour maintenir l'état de charge des batteries au-dessus de la limite recommandée.
- Permet d'atténuer l'inflation fréquente du prix du carburant et que la source d'énergie renouvelable est fiable.
- Réduction de l'impact environnemental.

- **Inconvénients**

- Coût d'investissement supplémentaire des sources d'énergie renouvelables, des batteries et de l'électronique de puissance.
- Expérience limitée des clients et des services publics d'approvisionnement en matière d'énergie renouvelable et de technologie des systèmes électriques hybrides.
- Les systèmes sont généralement plus complexes.
- Analyse économique du cycle de vie requise - basée sur une simulation détaillée du système.

1.10 Conclusion

Dans une perspective de préservation de l'environnement et de la planète, la nécessité de faire recours à des sources d'énergie vertes s'impose, cependant, comme nous l'avons abordé dans la problématique, ces dernières sont intermittentes. Il est donc de notre intérêt d'étudier la complémentarité des différentes ressources, d'où l'hybridation qui est une solution très prometteuse.

Dans ce chapitre nous avons fait un panorama sur les générateurs les plus communément utilisés dans la conception des SEH existants. Il en ressort que la configuration PV/Eolien est la plus répandue, et la plus attrayante en termes de fiabilité et d'efficacité. Un aperçu a également été donné sur les architectures/configurations avec pour chacune leurs avantages et inconvénients. Enfin, l'implantation de micro-réseaux autonomes, ou interconnectés, promettent d'être la solution d'un proche avenir.

Dans ce qui suit, nous aborderons les toutes dernières innovations associées aux générateurs PV/éoliens qui pourront, grâce au gain en puissance et en efficacité, être des alternatives intéressantes.

CHAPITRE 02 :

Nouvelles

technologies du

solaire

photovoltaïque et

éolien

2.1 Introduction

Les systèmes électriques du monde entier sont en train de changer. La demande mondiale et la dépendance à l'égard de l'électricité augmentent et, à mesure que les préoccupations environnementales deviennent plus pressantes, l'accent est mis sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre [28]. Il en résulte une évolution vers un système électrique décarboné basé sur un grand volume de production d'énergies renouvelables variables, principalement fournies par l'éolien et le solaire photovoltaïque (PV). La technologie solaire photovoltaïque est l'une des technologies renouvelables qui a le potentiel de façonner un système électrique propre, fiable, évolutif et abordable pour l'avenir [29]. Considérant ce fait, les gouvernements du monde entier encouragent le développement et le déploiement de la technologie solaire PV. Une large gamme de matériaux PV est disponible dans le monde entier. Globalement, des centaines d'entreprises sont impliquées dans la fabrication de modules PV avec des efficacités et des limitations variables. Dans le même temps, les coûts d'installation diffèrent d'un système à l'autre et d'un projet à l'autre. L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les technologies les plus récemment publiées sur les PV solaires en termes d'efficacité des matériaux et des modules, la situation mondiale du PV et les politiques motrices, les activités de recherche et développement (R&D) et les sources de financement, ainsi que le potentiel de production d'électricité.

Dans une seconde partie, le chapitre traitera un rassemblement, une organisation et une mise en évidence des connaissances et des informations liées aux nouvelles technologies dans le secteur éolien. Il ne s'agit pas d'une feuille de route pour l'avenir de l'énergie éolienne, mais plutôt un aperçu des technologies émergentes dont on pense qu'elles ont du potentiel. L'examen ne prétend pas être exhaustif, mais on pense qu'il représente néanmoins un large éventail d'innovations prometteuses pour l'avenir. Pour chaque technologie, on trouvera une discussion des principaux avantages et inconvénients, l'état de l'art et les tendances de développement possibles.

2.2 Nouvelles technologies du solaire photovoltaïque

Les premières cellules solaires en silicium cristallin ont été fabriquées par le laboratoire Bell en 1953 avec un rendement de 4,5 %, puis en 1954 avec des dispositifs à 6 % de rendement [30]. Au cours des dix années qui ont suivi la première démonstration, l'efficacité des cellules de silicium cristallin s'est améliorée pour atteindre environ 15 %, et était suffisamment efficace pour être utilisée comme source d'énergie électrique pour les vaisseaux spatiaux, les applications terrestres spéciales telles que les phares, et les produits de consommation tels que les calculatrices électroniques. Les améliorations de l'efficacité des cellules de recherche obtenues

pour divers types de cellules solaires au cours des 30 dernières années sont illustrées à la **figure 2.1** [31].

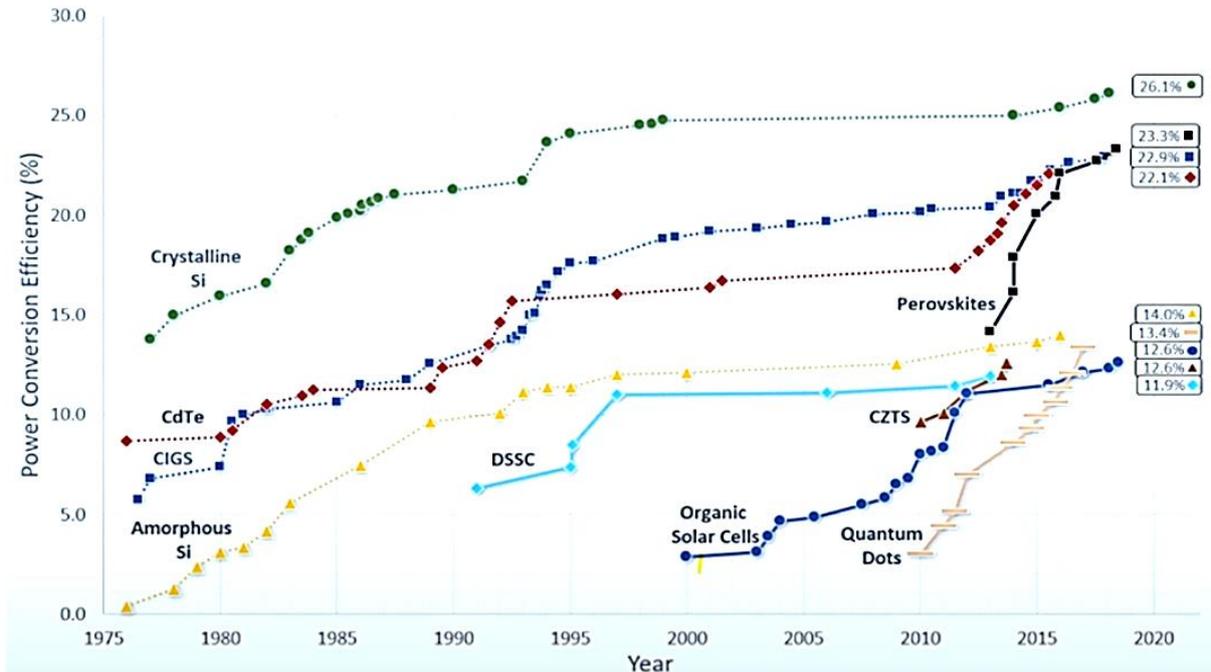


Figure 2.1 : Evolution chronologique de l'efficacité énergétique des cellules photovoltaïques [31].

Au niveau mondial, ce sont les technologies silicium mono et poly-cristallines qui ont pu être rapidement commercialisée, voici plus de 15 ans, et qui représentent aujourd'hui la très grande majorité des systèmes installés dans le monde.

L'industrie continue à améliorer leur rendement de conversion de l'énergie solaire. Sur une période de 13 ans, le poly-cristallin est ainsi passé de 20 à 22% de rendement maximum (+2%), tandis que le monocristallin est passé de 24,7 à 26,1% (+1,4%). Ces deux technologies atteignent néanmoins peu à peu leur rendement théorique maximal ($\sim 30\%$). Parmi les nouvelles technologies du solaire photovoltaïque, on peut citer : les demi cellules (Halfcut cells), les cellules bifaciales (Bifacial cells), les modules bi-verre (Glass-glass modules) et les multi-busbars.

Le **tableau 2.1** illustre chacune de ces technologies, leur niveau de maturité et les perspectives actuelles et avenir.

Tableau 2.1 : Niveau de maturité des nouvelles technologies PV

Niveau de maturité et perspectives	
Demi-cellules (Halfcut cells)	Selon l'ITRPV, une hausse significative est prévue dans un avenir proche - de moins de 3% de part de marché en 2017 à 5% en 2018 et 10% en 2020.
Cellules bifaciales (Bifacial cells)	D'une présence quasi négligeable en 2017, l'ITRPV prévoit que le concept bifacial gagnera près de 10 % de parts de marché en 2018, 15 % en 2020 et 40 % dans les 10 prochaines années.
Modules biverre (Glass-glass modules)	Malgré la faible croissance prévue à court terme, l'ITRPV s'attend à ce que la technologie s'accélère au cours des dix prochaines années et atteigne une part de 40 %.
Multi-busbars	L'ITRPV s'attend à ce que le schéma à trois barres soit progressivement abandonné et remplacé par des schémas à 4, 5, 6 barres et plus.

2.2.1 Cellules half-cut

La plupart des avantages des panneaux demi-coupés sont attribués à une diminution de moitié du courant interne du panneau. Réduire de moitié le courant diminue les pertes résistives, raison pour laquelle la performance est améliorée [32]. La **figure 2.2** illustre une comparaison des pertes joules engendrées par une demi-cellule et une cellule entière.

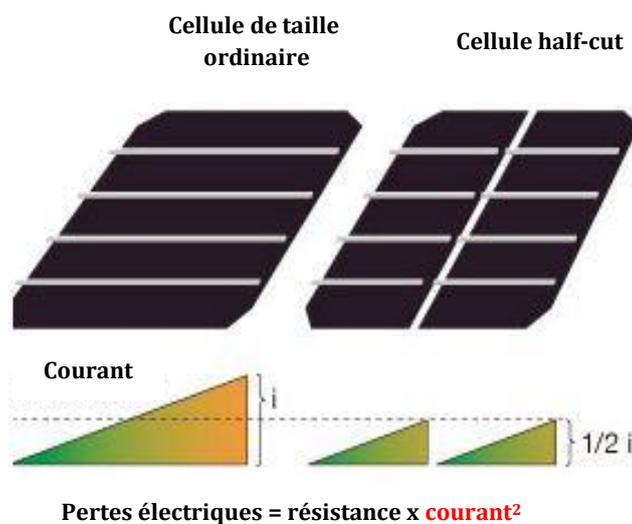


Figure 2.2 : Comparaison des pertes joules entre une demi-cellule et une cellule complète [32].

2.2.1.1 L'avantage de couper les cellules en deux

Il en résulte de nombreux avantages, tels qu'un rendement plus élevé, une meilleure production par m² et de meilleures performances thermiques. Les avantages de l'ombrage, une meilleure durabilité et quelques autres gains de performances sont également réalisés avec la configuration de panneau révisée nécessaire.

2.2.1.2 Réduction des pertes résistives

Dans un module solaire, des pertes d'énergie se produisent lorsque les électrons traversent les interconnexions des cellules et les busbars. Étant donné que la perte de puissance est égale à la résistance multipliée par le courant au carré (perte $P = R \times I^2$), une réduction du courant réduirait la perte. En divisant la cellule en deux moitiés, le courant (et non la tension) de la cellule. Ainsi, en appliquant cette modification à l'équation, les pertes sont réduites de 75%. **Comme le courant est le plus élevé en période de pointe, c'est là que le bénéfice est le plus important.** Réduire le courant pour réduire les pertes n'est pas une nouveauté, cela se fait depuis plus d'un siècle pour le transport de l'énergie. Cependant, le double de cellules à moitié de courant double notre tension comme le démontre la **figure 2.3**, ce qui aurait des conséquences indésirables sur la conception du système. Ceci est résolu dans la configuration révisée du panneau.

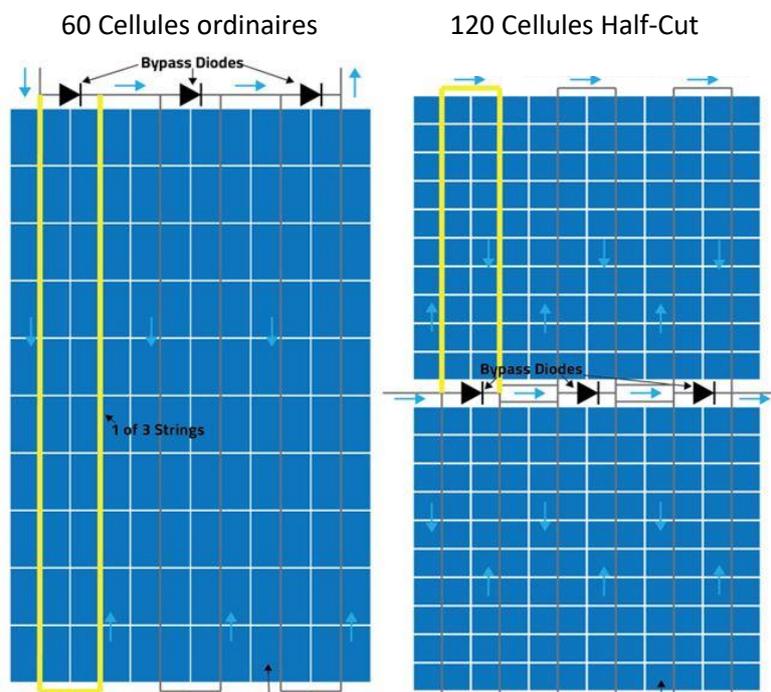


Figure 2.3 : Panneau standard à 60 cellules vs 120 cellules demi-coupées [32].

Pour comprendre comment cela fonctionne, l'on doit connaître les éléments suivants :

- L'ajout de cellules dans une chaîne (série) accumule de la tension et non du courant

- L'ajout d'une deuxième chaîne de cellules (en parallèle) accumule du courant et non de la tension

Donc, si les 120 demi-cellules coupées étaient câblées dans une chaîne, nous aurions deux fois la tension et la moitié du courant d'un panneau normal à 60 cellules. Pour résoudre ce problème, les fabricants ont repensé la disposition des cellules afin que deux chaînes de 60 panneaux de cellules demi-coupés soient assemblées en parallèle. Le résultat global est assez intelligent, car la tension et le courant qui en sortent sont identiques à ceux d'un panneau standard à 60 cellules, mais le courant interne est divisé par deux. Cela se traduit par une augmentation de l'efficacité de 1,5 à 3%, ce qui est plus profond qu'il n'y paraît. Il a également des effets secondaires souhaitables.

2.2.1.3 Amélioration de la gestion de l'ombrage

Comme mentionné, le changement de disposition permet au panneau de mieux fonctionner sous certains scénarios d'ombrage. En premier lieu, il faut noter que l'ombrage aura toujours un impact significatif sur le système, même si c'est l'un des avantages de ce type de panneaux.

Dans ces conditions ; les fabricants insistent que la moitié supérieure du panneau puisse fonctionner sans être affectée si la moitié inférieure est à l'ombre, ou inversement. En effet ; lorsqu'on a deux chaînes connectées en parallèle (comme le sont la moitié supérieure et inférieure de ces panneaux), on pourra isoler la cellule de courant inférieure sur ce côté uniquement. Ainsi, une moitié peut produire à 10% de sa capacité et l'autre sera à plein rendement.

2.2.1.4 I-V half cut cells

Dans la **figure 2.4** deux configurations de modules PV sont comparées, l'une est à base des cellules Half-cut tandis l'autre est à base des cellules ordinaires.

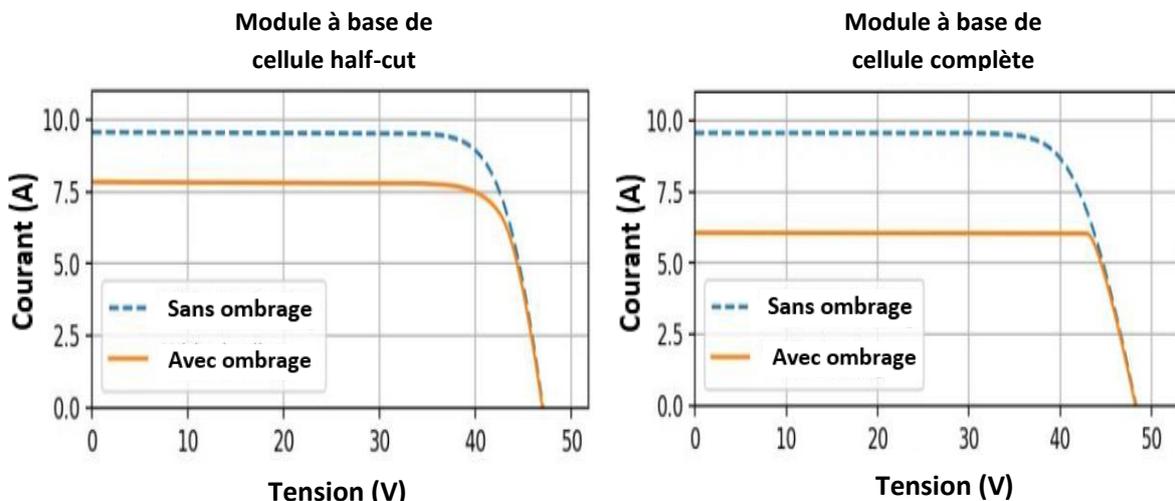


Figure 2.4 : Comparatif des caractéristiques I-V d'un module à base de cellules half-cut et d'un module à base de cellules ordinaires [32].

Les modules sont confrontés aux mêmes conditions d'ombrage. Il est clair qu'il existe une amélioration significative du courant débité par le module à base de half-cut cellules et donc une nette progression de la caractéristique I-V par rapport aux modules à base de cellules ordinaires. Ceci est dû à une meilleure gestion d'ombrage ce qui améliore l'efficacité de ces modules.

2.2.2 Cellules solaires bifaciales

Les cellules solaires bifaciales sont en cours de développement depuis des décennies et leur processus de fabrication peut être considéré comme l'un des plus avancés des modules solaires actuels [33]. Les cellules bifaciales sont capables de générer de l'électricité non seulement à partir de la lumière solaire reçue sur leur face avant, mais aussi à partir de la lumière solaire réfléchie reçue sur la face arrière de la cellule comme le montre la **figure 2.5**.

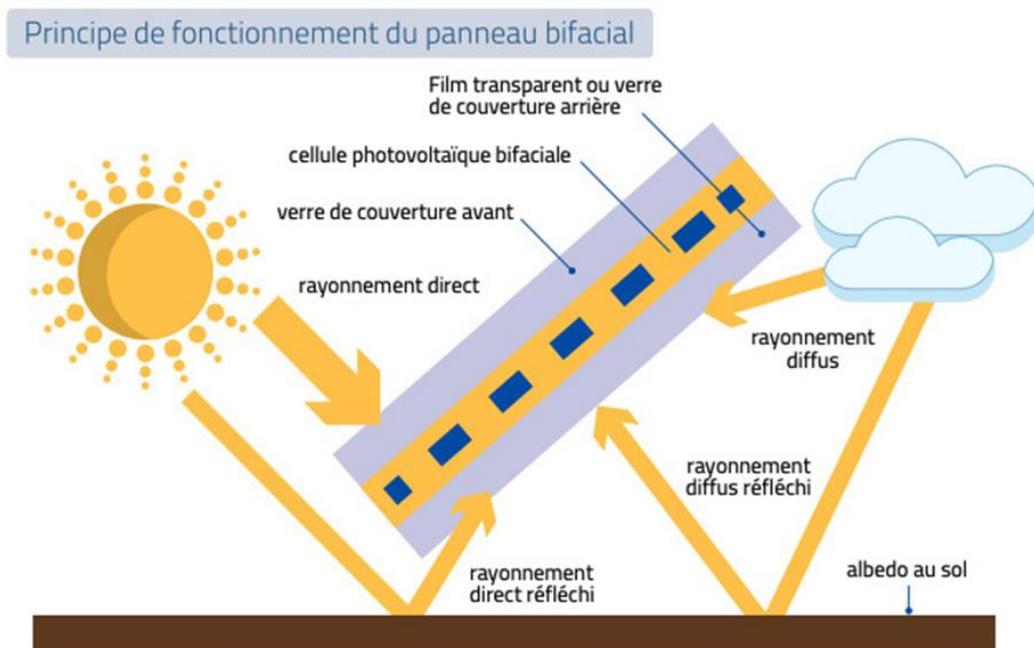


Figure 2.5 : Principe de fonctionnement du panneau solaire bifacial [33].

En 2017, la majorité des modules photovoltaïques installés sont basés sur des cellules solaires en silicium de type p qui présentent un contact arrière en aluminium sur toute la surface et un BSF (back surface field). En raison de leur face arrière opaque et entièrement couverte, ces cellules sont incapables de convertir en électricité la lumière qui tombe sur la face arrière des cellules solaires. En revanche, les cellules solaires dont la face arrière n'est que partiellement recouverte de métallisation (appelées cellules solaires bifaciales) sont capables de convertir simultanément et efficacement la lumière qui éclaire la cellule solaire depuis la face avant et la face arrière [34].

Cela pourrait changer très rapidement, car depuis 2018, la technologie dite PERC (passivated emitter and rear cells), qui peut également être fabriquée de manière bifaciale (voir **figure 2.6**), domine le marché.



Figure 2.6 : Panneau solaire bifacial utilisé comme ombrière [34].

2.2.2.1 Modules bifaciaux : options de conception, caractérisation et fiabilité

Les modules bifaciaux sont une conséquence logique de l'évolution du photovoltaïque. De nombreux fabricants de modules bifaciaux optent pour des panneaux à double verre, en raison de la durée de vie plus longue du système. Les verres des modules devenant plus fins et plus rentables, la feuille de face arrière blanche est remplacée par un verre transparent. Par conséquent, il est également possible de se débarrasser du coûteux cadre en aluminium du module qui est nécessaire pour un module standard verre/feuille arrière afin de fournir une stabilité mécanique suffisante pour construire des modules mono-faciaux à double vitrage.

Il faut noter que de nombreux éléments de modules, doivent être optimisés, tels que la forme et l'emplacement d'une boîte de jonction qui ne doit pas faire d'ombre à la face arrière du module bifacial. En effet ; dans les dispositifs bifaciaux de grandes densités de courant seront générées par la lumière supplémentaire qui pénètre par la face arrière du module. De plus ; afin de minimiser les pertes résistives, la métallisation doit être adaptée en conséquence. Ces normes

sont nécessaires pour fournir aux clients une mesure qui soit comparable au Watt crête près (à STC) en termes de capacité de production d'énergie (kWh/kWc)

2.2.2.2 Systèmes photovoltaïques bifaciaux et données de rendement (gain bifacial)

Les premiers travaux qui démontrent un gain de puissance en exploitant les modules bifaciaux remontent à la fin du vingtième siècle. Récemment, un effort important a été fait pour quantifier et prédire le rendement énergétique des modules PV bifaciaux pour différentes configurations d'installation : autonomes, centrales PV, orientation Est et Ouest par rapport aux modules standards. Il faut signaler que le calcul de l'énergie des modules bifaciaux est plus complexe, en tenant compte de la hauteur d'installation du module, le coefficient de réflexion du sol (albédo), la distance entre les rangées de modules et entre les modules voisins de la même rangée, et l'auto-ombrage des modules sur le sol [35] .

Une motivation majeure pour les systèmes photovoltaïques bifaciaux est le rendement énergétique supplémentaire attendu, par rapport aux panneaux mono faciaux, en raison de la sensibilité à la lumière des deux côtés. Le potentiel d'amélioration de la puissance et du rendement énergétique des modules a été démontré à plusieurs reprises par des simulations, des mesures sur des modules autonomes ou des installations dans différentes orientations. Cependant, les incertitudes concernant le rendement réel des systèmes projetés, dissuadent toujours les investisseurs potentiels [36] . Même au sein de la communauté PV, le bénéfice quantitatif réel dû au caractère bifacial ainsi que les concepts techniques les mieux adaptés font encore l'objet de discussions, comme en témoignent les nombreuses publications traitant de ces sujets. En effet ; depuis 2018, le panneau solaire bifacial connaît un véritable engouement avec une efficacité accrue offrant un gain de production de 25 à 40%, et un coût réduit du mégawattheure. Ceci dit que la technologie bifaciale pourrait bientôt remplacer la cellule photovoltaïque mono-faciale classique. De plus les modules solaires bifaciaux présentent de nombreux avantages sur leurs confrères. En premier lieu, l'électricité peut être produite sur les deux faces du module solaire, ce qui accroît la quantité totale d'énergie produite [37] .

Pour ce faire, il est essentiel que les panneaux bifaciaux ne soient pas posés sur une toiture, mais fixés sur une structure placée en hauteur, pivotante ou non, afin d'utiliser au maximum l'albédo qui mesure la proportion du rayonnement solaire réfléchi par le sol. Les panneaux bifaciaux ainsi, convertissent ce rayonnement lorsqu'il est capté par leur face arrière. Il faut signaler que l'albédo varie en fonction de la nature de la végétation ou du sol, de la position du soleil, et de la hauteur des modules. En effet ; lorsqu'un équipement est éloigné du sol, il capte mieux le rayonnement réfléchi ; de plus un pavement réfléchira plus de rayonnement que l'herbe ou que l'asphalte noir [38] .

L'albédo est relativement stable dans des régions comme le Proche-Orient. Par contre il peut connaître de fortes amplitudes dans les zones nordiques lorsque la neige fond (Voir **figure 2.7**). En hiver, quand le sol enneigé augmente l'albédo et que le rayonnement direct est plus faible, les panneaux bifaciaux offrent le gain de production le plus élevé (de l'ordre de 40% supplémentaire à cette période de l'année).



Figure 2.7 : Champ de panneaux bifaciaux suspendus [38].

Le rayonnement reçu par un module dépendra dans une large mesure de la réflectivité (albédo) des objets proches et du sol. Ceci est particulièrement important pour les modules verticaux aux alentours de midi en été, lorsque l'ensoleillement direct est le plus intense mais que l'angle du rayonnement solaire direct reçu par les modules est relativement faible. Un panneau bifacial vertical (**figure 2.8**) réduit l'accumulation de poussière et de neige et fournit deux pics de sortie pendant la journée, le second pic étant aligné sur la demande de pointe en électricité



Figure 2.8 : Panneau bifacial vertical [38].

L'une des raisons de l'augmentation de la production d'énergie est que la température du module est-ouest est plus basse pendant la période d'éclairage énergétique maximale que celle du module orienté au sud. De nombreux réseaux à fortes pénétrations d'énergie solaire présentent un excédent d'énergie pendant les périodes de pointe de la production à midi et une pénurie pendant les périodes creuses [39]. Déplacer les pics en utilisant l'orientation verticale est-ouest pour les nouveaux PV donne une courbe de production d'énergie plus uniforme (Voir la **figure 2.9**).

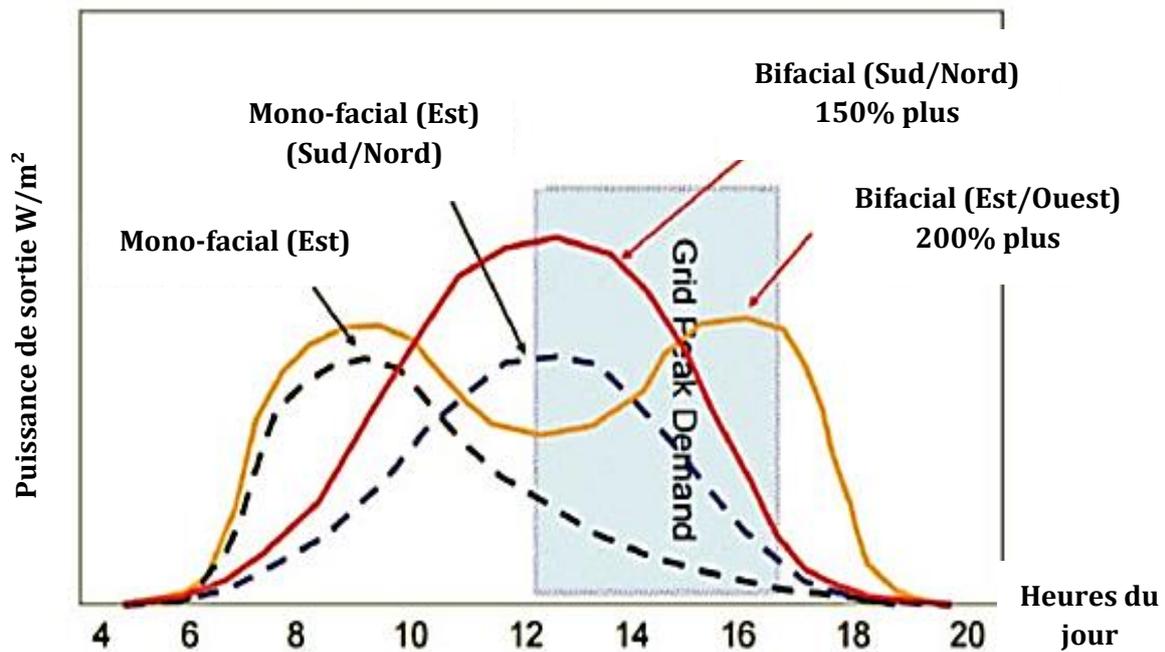


Figure 2.9 : Moyenne annuelle de la puissance journalière d'une cellule bifaciale [39].

Dans les contrées désertiques, le pouvoir réfléchissant du sol permet aux centrales solaires bifaciales de bénéficier d'un albédo très élevé. L'idéal est de poser les panneaux sur un revêtement en béton peint en blanc, mais le coût du revêtement risque d'avoir un impact négatif sur le LCOE (Levelized Cost Of Energy, ou coût actualisé de l'énergie).

2.2.2.3 Caractéristique I-V et P-V

La comparaison entre les caractéristiques I-V/P-V d'une cellule mono-faciale et bi-faciale montre une nette amélioration du courant et de la tension délivrés, et par ailleurs la puissance délivrée (voir la **figure 2.10**), et ce du fait de la forte irradiation à laquelle est exposée la cellule, en captant d'une part le rayonnement direct, et d'autre part le rayonnement diffus grâce à sa face arrière qui lui profère une double absorption.

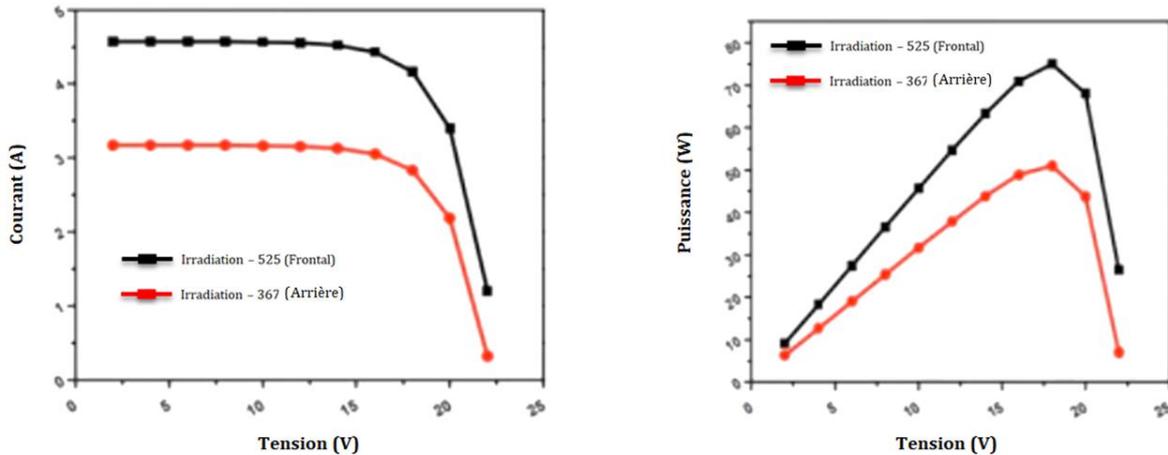


Figure 2.10 : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule bifaciale pour les deux faces avant et arrière (525W/m^2 avant et 367W/m^2 arrière) [39].

2.2.2.4 P-type et N-type bifaciale

Il existe essentiellement deux technologies qui présentent des coefficients de bifacialité différents : la technologie monocristalline p-PERC (Passivated Emitter and Rear Contact), actuellement la plus utilisée, et la technologie polycristalline appelée n-PERT (Passivated Emitter Rear Totally diffused) ou solaire à hétérojonction (HJT) (voir la **figure 2.11**)

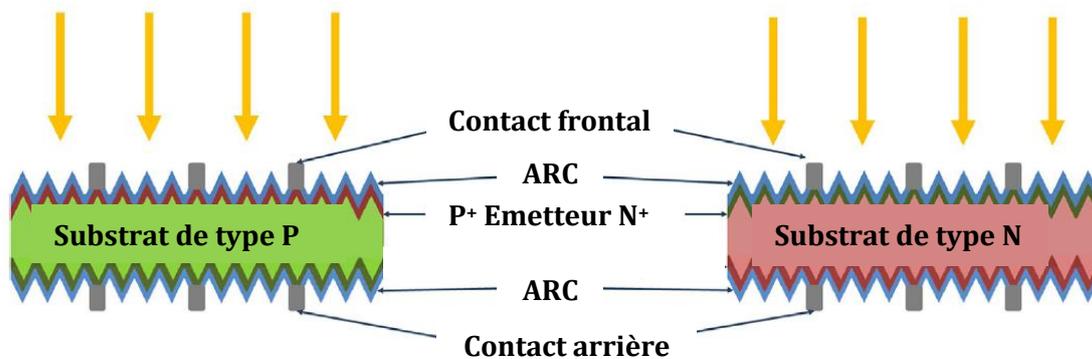


Figure 2.11 : Vue en coupe de cellules solaires en silicium cristallin bifaciales de type n et de type p standard [40].

Le coefficient de bifacialité exprime le rapport entre la puissance nominale de la face inférieure et celle de la face supérieure [40]. Ce ratio dépend de la technologie des cellules et du type de parois du module (verre, polymère, ...), et est généralement compris entre 60 et 95%. Le coefficient de bifacialité exprime donc l'efficacité de la face arrière par rapport à la face avant pour une même intensité de rayonnement.

Les panneaux n-PERT ou HJT présentent un meilleur comportement bifacial (95% de bifacialité), mais leur coût est plus élevé, ce qui les disqualifie des marchés publics actuels. Le type p-PERC reste le moins cher sur le marché, et offre 70 à 90% de bifacialité.

2.2.2.5 Gain de production

Si les laboratoires manquent de retours d'expérience, les études réalisées à ce jour montrent qu'un panneau bifacial offre en moyenne une productivité accrue de 10% à 20% par rapport à un panneau monofacial classique. Le gain peut même être de 30 à 40% lorsque le panneau est placé sur un tracker. Le **tableau 2.2** énumère les différents avantages d'un panneau bifacial par rapport à un panneau classique.

Il a été établi que les installations bifaciales fixées sur des trackers à axe horizontal permettent de réaliser un gain de production de 35% et d'obtenir un coût d'énergie actualisé (LCOE) minimal, quel que soit l'endroit de la planète [41]. Des gains jusqu'à 40% ont été enregistrés lorsque les conditions de mesure sont optimales.

Tableau 2.2 : Avantages du bifacial par rapport au monofacial

	Monofacial	Bifacial
Puissance STC	++	++
Propriétés du module	+	++
Angle d'orientation	+	++
Hauteur	0	++
Albedo	+	++
Structure	0	+

2.2.2.6 Un coût de fabrication en chute libre

La baisse du coût de production des modules bifaciaux promet à cette technologie un avenir radieux. Alors que ce coût s'établit aujourd'hui à 50 €/MWh pour une grande installation photovoltaïque fixe, les fermes solaires bifaciales affichent parfois un LCOE de 17€/MWh. Comme exemple ; en mois de juillet dernier, une installation bifaciale de 2 GW à Abu Dhabi a été concédée par adjudication au prix de 11,4 €/MWh. En octobre 2019, un parc de 900 MW en bifacial avec

tracking avait déjà été attribué au prix de 14,4 €/MWh [42] . Les trois dernières années ont démontré que la technologie du panneau bifacial va devenir incontournable pour le marché des fermes solaires de grande puissance. Les modules bifaciaux représentaient déjà 10 % des nouvelles installations en 2018, et 15% en 2019. Selon la plate-forme d'études de marché Taying, ils devraient atteindre 50 % du marché mondial au cours de la prochaine décennie. Mais, dans le secteur photovoltaïque, les prévisions sont souvent dépassées par la réalité.

2.2.3 Le module photovoltaïque bi-verre

L'avantage principal des modules bi-verre réside dans les propriétés mêmes du matériau qui les composent : le verre ne se dégrade pas. C'est pourquoi les modules bi-verre peuvent aisément traverser les décennies [43].

Les deux couches de verre situées en face avant et arrière du module confèrent une étanchéité parfaite contre la condensation, les variations de températures et les agressions extérieures. Ces cellules photovoltaïques à haut rendement sont ainsi protégées contre les agressions chimiques telles que la brume saline, l'ammoniac, les variations de températures ou encore les tempêtes de sable. L'utilisation de verre sur chaque face donne également au module une résistance mécanique accrue. Les cellules sont protégées contre les forces de pression et dépression causées par les vents violents ou la neige. On évite ainsi les pertes de rendement liées aux micro-fissures. Il est clair d'après la **figure 2.12** que les modules verre-film sont soumis à des contraintes mécaniques élevées, elles ne sont pas assez protégées et se fissurent très fréquemment, ce qui réduit leur rendement années après années.

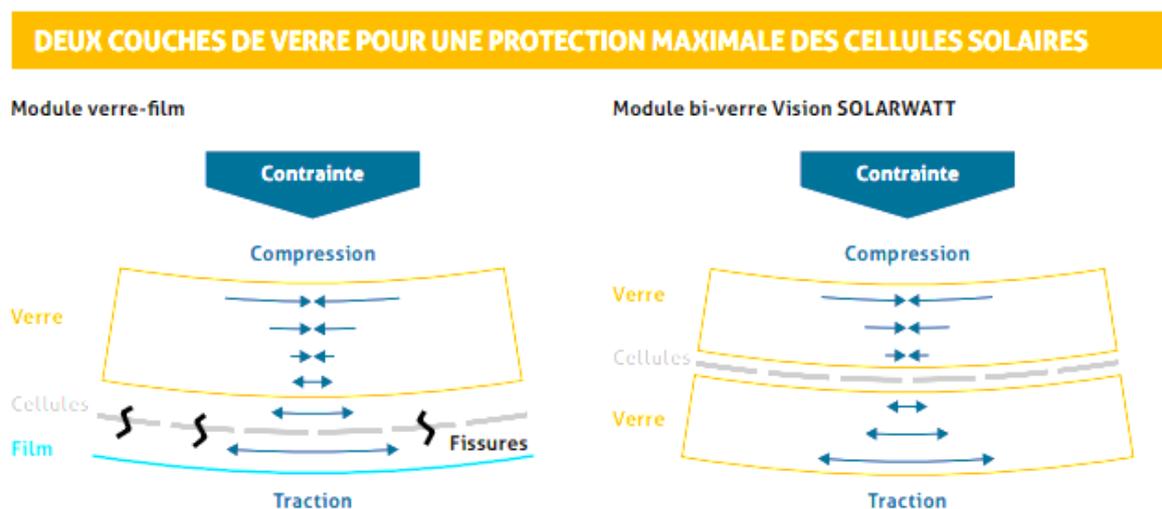


Figure 2.12 : Comparaison entre un module verre-film et un module bi-verre [43].

Contrairement aux modules bi-verre dont les cellules sont positionnées sur un axe neutre où les compressions et les tractions sont minimales ce qui empêche toutes les éventuelles fissures.

2.2.3.1 Le bi-verre face au verre-film :

Les modules bi-verre ont non seulement une durée de vie beaucoup plus élevée que les modules photovoltaïques standards mais produisent aussi beaucoup plus d'électricité au cours de celle-ci.

En se penchant sur l'aspect économique de la technologie bi-verre par rapport au verre-film, les consommateurs ne prennent souvent en compte que le ratio coût d'investissement par rapport au rendement annuel (€ / kWh). Cependant, le ratio le plus important à prendre en compte est celui du coût d'investissement par rapport au rendement du module sur l'ensemble de sa durée de vie (€ / kWh produits sur toute la durée de vie) [44]. Le bi-verre apparaît donc beaucoup plus intéressant, ces modules ont une durée de vie deux fois plus longue et leur production d'électricité est beaucoup plus importante (plus du double d'électricité solaire produite). Un investissement amorti.

2.2.3.2 Une énergie, garantie pendant 30 ans :

Les modules photovoltaïques ne doivent pas seulement générer une énergie respectueuse de l'environnement, mais aussi polluer le moins possible. D'un point de vue écologique, cela n'a pas de sens de devoir jeter, recycler et remplacer ces panneaux tous les 15 ans (Voir **Figure 2.13**).

A la 30ème année de fonctionnement, les modules verre-verre garantissent une production encore au minimum de 87 % de leur puissance nominale de départ.

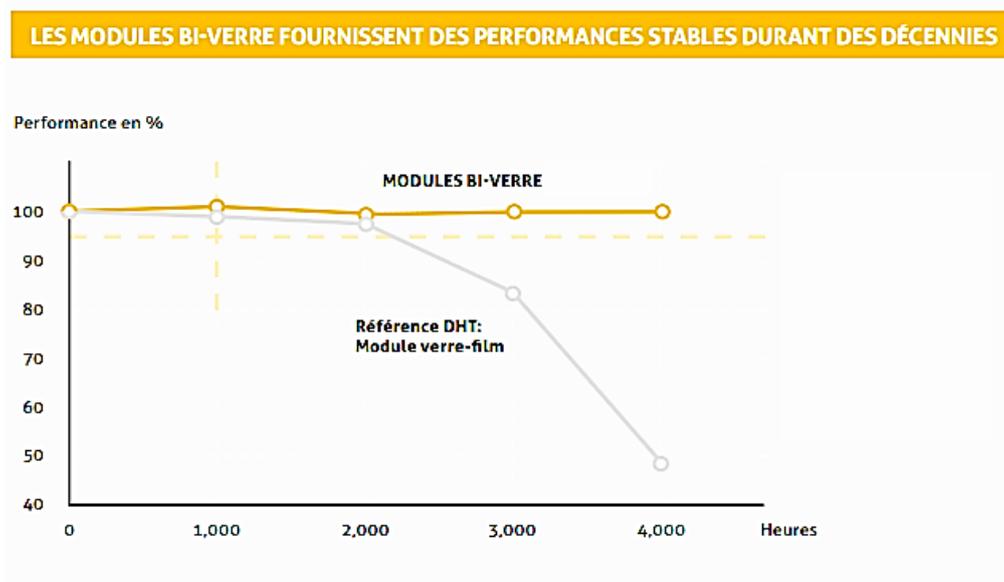


Figure 2.13 : Performances du module bi-verre [44].

2.2.4 Cellules multi-busbars

Les cellules solaires au silicium sont métallisées à l'aide de fines bandes de forme rectangulaire imprimées à l'avant et à l'arrière d'une cellule photovoltaïque solaire. Ces contacts métalliques sont appelés jeux de barres et ont une fonction importante : ils conduisent le courant continu généré par la cellule photovoltaïque solaire, ce type de cellule est composé de divers éléments à savoir :

2.2.4.1 Jeu de barres de cellules solaires

Les busbars des cellules solaires sont souvent construites en cuivre recouvert d'argent. Le revêtement d'argent est nécessaire pour améliorer la conductivité du courant (face avant) et pour réduire l'oxydation (face arrière) [45].

2.2.4.2 Fingers de la cellule solaire

Les fingers de grille métallique est une terminologie anglaise qui signifie doigts de cellules solaires, et sont perpendiculaires aux busbars, ce qui permet de collecter le courant généré et de le livrer aux busbars. Ces contacts - les barres et les doigts - sont imprimés sur la surface de la cellule photovoltaïque solaire via une technologie appelée sérigraphie (Voir la **figure 2.14**).

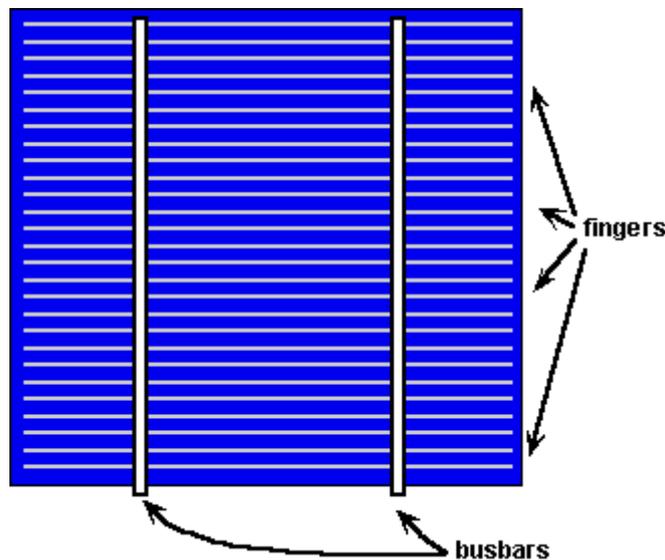


Figure 2.14 : Cellule Busbar [45].

2.2.4.3 Onglets :

Les cellules photovoltaïques solaires doivent être connectées en série, formant des rangées, pour obtenir des tensions appropriées.

L'onglet est brasé manuellement ou automatiquement sur le jeu de barres des cellules solaires, qui connecte les cellules individuelles en série avec une résistance faible [46].

L'onglet est également fabriqué à partir de fil de cuivre rond, par un processus de laminage et est recouvert d'une couche de soudure.

2.2.4.4 Fils de bus :

Des groupes de chaînes de cellules câblées à onglets sont connectés en parallèle par des fils de bus qui transmettent ensuite le courant cumulé de toutes les cellules à la boîte de jonction PV.

Etant donné que le fil de bus doit supporter plus de courant que l'onglet, il doit également avoir une épaisseur et une largeur supérieures pour permettre une résistance moindre par unité de longueur (Voir **figure 2.15**).

Le fil de bus conducteur est également fait du même matériau que le fil de l'onglet conducteur.

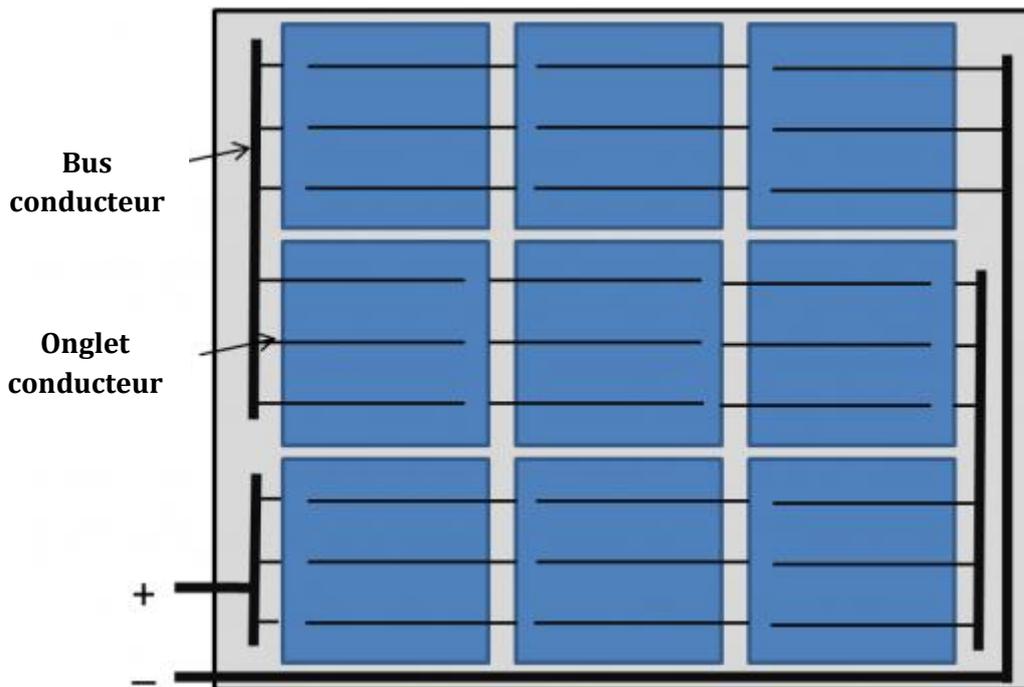


Figure 2.15 : Connexion des fils au cœur de la cellule [46].

2.2.4.5 Développement de la conception de contact :

Le compromis clé dans la conception des contacts supérieurs consiste à trouver un équilibre optimal entre les pertes de résistance accrues associées à une grille largement espacée et la réflexion accrue provoquée par une fraction élevée de la couverture métallique de la surface supérieure.

À cet égard, les paramètres requis sont la hauteur et la largeur des barres, la largeur des fingers, les distances entre les fingers et les barres, ainsi que le type et la qualité du métal.

Une méthode de plus en plus utilisée par l'industrie consiste à repenser la conception et la fabrication des cellules, ce qui améliorera encore l'efficacité et la fiabilité et réduira considérablement les coûts des matériaux, notamment en ce qui concerne la pâte d'argent utilisée dans la fabrication des multi-busbars.

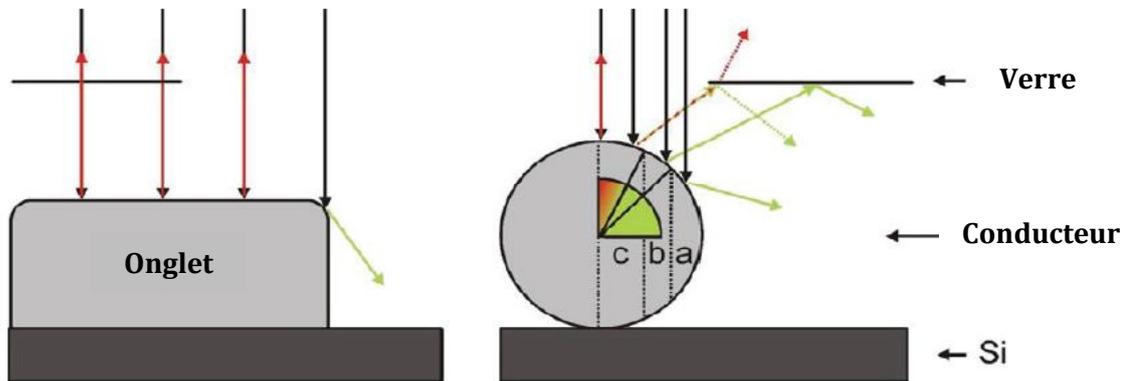


Figure 2.16 : Rayons descendant sur un onglet de busbars (à gauche) et sur un fil rond (à droite) [46].

Il faut signaler que l'ombrage effectif d'un fil est beaucoup plus faible parce que les faisceaux incidents perpendiculaires seront réfléchis sur le fil conducteur et toucheront dans une certaine mesure la surface de la cellule, alors que presque tous les faisceaux incidents perpendiculaires descendant sur un onglet de barre rectangulaire aux bords arrondis n'entreront pas en contact avec la surface de la cellule. Les deux cas sont illustrés à la (**figure 2.16**) au-dessus. Pour un fil conducteur rond, il y a trois régions d'importance. Dans la région (a), le faisceau est directement réfléchi sur la surface de la cellule. Par conséquent, la zone ombrée effective est réduite à 70,1% de la zone réelle. Dans la région (b), les rayons réfléchis par le fil conducteur sont totalement réfléchis sur le verre du module. En supposant un indice de réfraction de 1,5 pour le verre du module, la zone d'ombrage effective est réduite à 35,7 %. Dans la région (c), les rayons réfléchis par le fil conducteur rond sont à nouveau réfléchis sur le verre du module, mais l'angle d'incidence est maintenant plus grand que l'angle de réflexion totale, le faisceau est donc divisé en une partie réfléchie et une partie transmise. Cela diminue également la zone d'ombre effective du fil et conduit à des courants de court-circuit plus élevés [46].

2.2.4.6 Avantage de la réduction de l'espace entre les busbars :

La réduction de l'espace des jeux de barres aidera le module PV multi-busbars à réduire l'intensité de l'électricité entre chaque cellule, afin d'augmenter l'efficacité du module PV.

Par exemple comme le montre la **figure 2.17**, la surface des busbars est inférieure de 22% sur les cellules 9BB par rapport aux cellules 5BB, ce qui augmentera la surface de réception des cellules et la puissance du module PV [47].

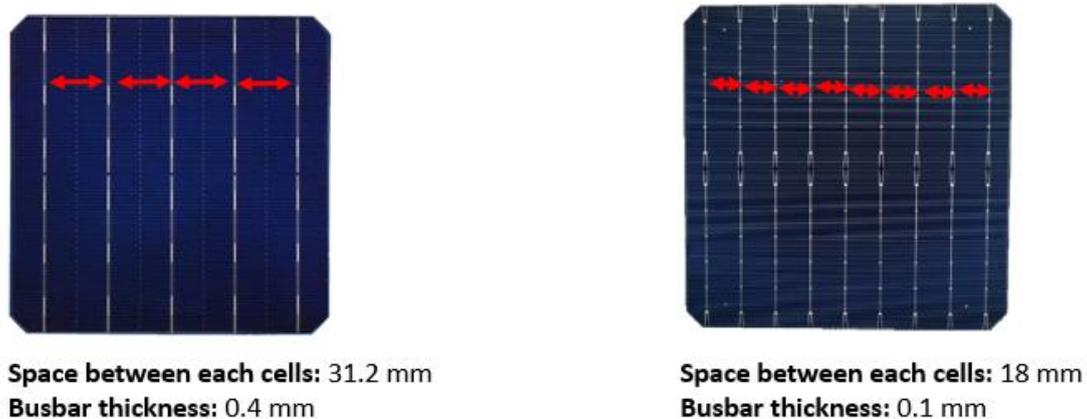


Figure 2.17 : Comparatif entre une cellule 5BB et 9BB [47].

Finalement, il a été démontré que l'efficacité d'une cellule solaire doit être examinée dans des conditions d'interconnexion pour révéler tout le potentiel du concept de la cellule. Dans ces conditions, la conception multi-busbars démontre ses avantages par rapport à une conception de cellule ordinaire.

La géométrie de la grille multi-busbars augmente le rendement des cellules solaires incorporées dans un module de 0,5 %. En outre, le concept de cellules multi-busbars permet d'économiser de manière significative de l'argent par cellule.

Un autre effet bénéfique du concept multi-busbars est la géométrie des fils. En utilisant des fils ronds, la lumière du soleil peut pénétrer davantage dans le semi-conducteur en raison d'une réflexion sur le fil et le verre du module. Cela entraînera des courants et des rendements encore plus élevés pour cette conception de cellule.

2.3 Nouvelles technologies des éoliennes :

Au cours des 30 dernières années, la taille des éoliennes a augmenté d'un facteur de 10 alors que le coût de l'énergie a diminué d'un facteur supérieur à 5, et l'industrie est passée d'une activité marginale idéaliste à l'industrie de la production d'électricité. Dans le même temps, la base d'ingénierie et les outils de calcul se sont développés pour s'adapter à la taille et au volume des machines. Jusqu'à présent, c'est une histoire remarquable de l'éolienne ; cependant, elle est loin d'être finie ; de nombreux défis techniques restent à relever et des réalisations encore plus spectaculaires suivront [48] [49] [50]. Certaines des caractéristiques importantes de l'éolienne seront discutées ci-après.

2.3.1 Technologie des éoliennes modernes et défis :

L'éolienne, qui est principalement de type à axe horizontal et de type à axe vertical, peut convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Bien que l'éolienne à axe horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) soit un type courant, l'éolienne à axe vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) est de plus en plus appréciée dans le monde, en particulier l'éolienne à pales droites, en raison de ses avantages tels que son faible coût, sa facilité d'installation et d'entretien, etc. Sur la base du fonctionnement du système de conversion de l'énergie éolienne, il peut également être divisé en deux catégories : la traînée aérodynamique et la portance aérodynamique. Le principe de la traînée a été utilisé par les premières roues VAWT persanes qui ont un coefficient de puissance très faible, avec un CP, max d'environ 0,16 seulement. Cependant, les éoliennes modernes sont principalement basées sur la portance aérodynamique [51] [52]. La comparaison entre les HAWT et les VAWT et leurs avantages et inconvénients ont été présentés dans le **tableau 2.3**.

Tableau 2.3 : Comparaison entre HAWT et VAWT

HAWT	VAWT
1 L'axe de rotation de l'éolienne reste horizontal.	L'axe de rotation reste vertical.
2 Elle est capable de produire plus d'électricité à partir d'une quantité donnée de vent.	Elle produit jusqu'à 50 % d'électricité en plus sur une base annuelle par rapport aux turbines classiques ayant la même surface balayée.
3 Elle convient aux applications éoliennes de grande envergure.	Elle convient aux petits projets éoliens et aux applications résidentielles.
4 Comparativement plus lourde et ne convenant pas aux vents turbulents.	Plus légère et produit bien dans des conditions de vent turbulent.

5 Les HAWT sont alimentées uniquement par le vent de direction spécifique.	Les turbines à axe vertical sont alimentées par le vent venant de tous les 360°, et les turbines sont alimentées même lorsque le vent souffle de haut en bas.
6 Ne convient pas pour produire de l'électricité à partir d'un vent dont la vitesse est inférieure à 6 m/s et dont la vitesse de coupure est généralement de 25 m/s.	Produit de l'électricité dans des vents aussi faibles que 2 m/s et continue à produire de l'énergie dans des vents allant jusqu'à 65 m/s, selon le modèle.
7 Elles ne peuvent pas résister à des conditions climatiques extrêmes telles que le gel, la pluie verglaçante ou la neige abondante, ainsi qu'à des vents violents dépassant 50 m/s.	Résiste aux conditions climatiques extrêmes telles que le gel, la glace, le sable, le sel, l'humidité et les vents très forts dépassant 60 m/s.
8 Les oiseaux sont blessés ou tués par les hélices et se heurtent aux pales.	Ne nuit pas à la faune car les oiseaux peuvent détecter un objet solide et peuvent être vus sur les radars d'avions.
9 La plupart démarrent automatiquement.	Le couple de démarrage est faible et il faut parfois de l'énergie pour commencer à tourner.
10 Difficultés de transport et d'installation	Coûts de construction et de transport moins élevés

Depuis la commercialisation de la technologie des éoliennes au début des années 1980, de nombreux développements ont eu lieu, mais l'architecture de la conception générale a très peu changé. Dans les HAWT modernes, l'énergie éolienne est extraite au moyen d'un rotor horizontal, au vent de la tour, avec trois pales qui peuvent être inclinées pour contrôler la vitesse de rotation d'un arbre lié. Le rotor à trois pales possède généralement un palier avant séparé, avec un arbre à faible vitesse relié à une boîte de vitesses qui fournit une vitesse de sortie adaptée aux générateurs quadripolaires ou bipolaires les plus populaires. Dans une VAWT ou turbine à axe vertical, l'arbre est monté sur un axe vertical, perpendiculaire au sol. Les VAWT sont toujours alignés avec le vent. Cependant, le grand défi de l'industrie éolienne moderne est de concevoir une éolienne efficace pour exploiter l'énergie du vent et la transformer en électricité avec un rendement plus élevé et une géométrie moins encombrante [53] [54].

La **figure 2.18** montre les HAWT et les VAWT modernes.



Figure 2.18 : Eoliennes à axe horizontal et vertical [53][54].

2.3.2 Les paramètres en jeu :

Les paramètres principaux qui entrent en jeu afin d'augmenter l'efficacité des éoliennes sont les suivants :

2.3.2.1 Nombre de pales :

La détermination du nombre de pales implique des considérations de conception d'efficacité aérodynamique, de coût des composants, de fiabilité du système et d'esthétique. Dans les années 1980 et au début des années 1990, des tentatives sont faites pour commercialiser une conception d'éolienne à une ou deux pales ; cependant, la plupart des éoliennes modernes ont trois pales. La conception monopale est la plus efficace structurellement pour la pale de rotor car elle présente les plus grandes dimensions de section de pale avec toute la surface de pale installée dans une seule poutre [55] [56]. Cependant, avec un contrepoids pour équilibrer le rotor de manière statique, l'efficacité est réduite et une dynamique complexe est nécessaire pour qu'une charnière de pale puisse soulager les charges. L'efficacité aérodynamique augmente avec l'augmentation du nombre de pales mais diminue en retour. L'augmentation du nombre de pales d'une à deux donne une augmentation de 6 % de l'efficacité aérodynamique, tandis que l'augmentation de deux à trois ne donne qu'une efficacité supplémentaire de 3 % [57]. Le facteur décisif pour éliminer les éoliennes à une et deux pales du marché commercial a été l'impact visuel. Comme de nombreuses considérations de conception, le nombre de pales d'une éolienne est un compromis. Trois pales

donnent un bon compromis, pas trop de perturbation de l'air pour la pale suivante, et une quantité raisonnable d'énergie recueillie dans le flux d'air est délivrée au générateur électrique au sommet du mât [58] [59].

2.3.2.2 Contrôle de la puissance :

La fonction principale de la conception d'une éolienne est de produire de l'énergie électrique à un coût aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont conçues pour extraire un maximum d'énergie du vent et produire une puissance de sortie maximale. Cependant, lorsqu'une éolienne est conçue, elle ne tient pas compte de la puissance de sortie en cas de vent fort, car ils sont très rares. Pour éviter d'endommager l'éolienne par vent fort, il est nécessaire de gaspiller une partie de l'énergie excédentaire. Ainsi, toutes les éoliennes ont utilisé une sorte de contrôle de la puissance [60] [61]. L'éolienne moderne utilise principalement deux systèmes.

Tout d'abord, l'éolienne à régulation du pas où le contrôleur électronique vérifie la puissance de sortie de l'éolienne plusieurs fois par seconde. Lorsque la puissance de sortie de l'éolienne est trop élevée, le système de contrôle envoie un signal au mécanisme d'inclinaison des pales qui fait immédiatement tourner le rotor légèrement hors du vent. Inversement, lorsque la force du vent devient faible, le rotor revient à sa position initiale. Deuxièmement, l'éolienne à régulation par décrochage nécessite une régulation de la vitesse et une caractéristique couple-vitesse appropriée, intrinsèque à la conception aérodynamique du rotor. La géométrie de la pale du rotor de l'éolienne à commande de décrochage a été conçue pour qu'au moment où la vitesse du vent devient trop élevée, il se crée des turbulences du côté de la pale du rotor qui ne fait pas face au vent fort. Le décrochage empêche la force de levage de la pale d'agir sur le rotor [62] [63]. Les principales caractéristiques de ces deux systèmes sont présentées dans le **tableau 2.4**.

Tableau 2.4 : Principales caractéristiques du système de contrôle de puissance

Control passif	Control actif
Pas de lame fixe	Pente des pales activée par la commande de l'éolienne
Puissance passive : Contrôle par effet de décrochage	Contrôle actif de la puissance
Paramètre de contrôle : Vitesse du vent	Paramètres de contrôle : puissance de sortie, vitesse du vent et vitesse du rotor.

2.3.2.3 La spectaculaire évolution technologique des éoliennes :

Aujourd'hui, une éolienne produit environ 9000 MWh par an. C'est deux fois plus que les éoliennes de la génération précédente [64]. Les éoliennes terrestres (**figure 2.19**), produisent entre 4000 et 4500 MWh par an dans des conditions normales de vent (l'équivalent de la consommation électrique de 1000 ménages [65]).



Figure 2.19 : Champ éolien Onshore [65].

La plupart de ces éoliennes, construites il y a une dizaine d'années à peine, ont une hauteur totale qui ne dépasse pas 150 mètres (bout de pale compris), un rotor de 80 mètres de diamètre environ et une génératrice de 2 MW.

La nouvelle génération de machines que l'on installe aujourd'hui n'a plus rien à voir avec la précédente : nettement plus performantes, elles sont équipées de rotors de 115 ou 120 mètres de diamètre et atteignent des hauteurs de 180 ou 190 mètres. Ces moulins terrestres peuvent produire le double de leurs prédécesseurs, soit entre 7000 et 9000 MWh par an quand la force des vents est moyenne.

2.3.2.4 Augmentation de l'efficacité des éoliennes :

Une évolution spectaculaire est toujours multifactorielle. Dans la filière éolienne aussi, la recherche s'est portée activement sur l'ensemble des paramètres ayant un impact sur le productible : hauteur du mât, profil des pales, gestion optimisée des parcs, puissance de la génératrice, logiciels de calcul de la fatigue des composants, etc.

En matière de vent, il est un principe universel : plus on est haut, plus les vents sont forts, laminaires et constants. Il était donc logique que l'on cherche à hisser les nacelles des éoliennes plus en hauteur. Pour ce faire, il a fallu concevoir des mâts plus résistants, et assembler des grues pouvant atteindre des hauteurs importantes.

Aujourd'hui, les éoliennes qui composent les nouveaux parcs éoliens grimpent le plus souvent jusqu'à 180 voire 200 mètres de hauteur. L'Allemand Max Bögl Wind AG [66] a récemment mis au point une éolienne de 247 mètres de hauteur totale avec un mât de 178 mètres. Sauf contraintes aéronautiques particulières.

Pour rendre possible les défis techniques que ces hauteurs vertigineuses impliquent, les mâts sont constitués d'une combinaison de béton et d'acier, ce qui leur procure à la fois la robustesse du béton et la souplesse de l'acier pour supporter des rafales plus fortes. A puissance de rotor égale, un gain en hauteur de 30 mètres permet déjà de réaliser un surcroît de production de 10 à 15%. Si l'on ajoute à cela des génératrices plus performantes, atteignant maintenant 3,6 MW ou 4,2 MW de puissance installée pour tirer profit des vents plus forts en hauteur, on arrive à un gain total de productivité de 20 à 25%.

Mais le gain en production ne doit pas signifier la perte de confort pour les riverains. Entre autres innovations, l'ajout de « *serrations* », sortes de dents de scie ou de peignes posés sur les bords de fuite des pales, ont permis une réduction sensible du niveau de bruit (entre 1 et 3 dB), contribuant ainsi sensiblement au maintien de la qualité de vie des riverains.

Les peignes sont issus de la recherche en biomimétisme. Ils ont été conçus en s'inspirant des ailes de rapaces nocturnes, qui ont l'étonnante faculté de pouvoir s'abattre sur leur proie la nuit sans faire le moindre bruit. Les peignes permettent de réduire les turbulences générées en bout de pale, ce qui entraîne par conséquent une réduction du bruit aérodynamique émis par les pales.

2.3.2.5 Brider pour produire plus :

Les contraintes auxquelles une éolienne doit faire face sont nombreuses. L'effet de parc, ou effet de sillage lié à l'espacement entre les éoliennes, constitue l'une d'elles. Trop rapprochées, les éoliennes vont être gênées, et donc freinées, par les turbulences de la machine se trouvant en amont dans l'axe des vents. Trop distantes, l'espace disponible, déjà difficile à négocier, ne sera pas optimisé. Des chercheurs ont dès lors mis au point un logiciel permettant de modéliser le bridage optimal des éoliennes, en fonction de la direction du vent, de sa vitesse et de sa constance. L'objectif étant de permettre aux machines en aval de ne pas être trop perturbées par les turbulences que celle en amont génère [64].

De tels logiciels permettent des gains en efficacité, certes peu spectaculaires, mais qui, additionnés aux autres innovations technologiques, ont permis aux éoliennes de la nouvelle génération de battre des records de production. C'est tout bénéfique pour l'environnement !

2.3.3 Technologies des matériaux des pales :

Les pales représentent une partie très importante de l'éolienne, elles doivent être robustes pour assurer un bon fonctionnement pendant leurs durées de vie. En effet, au cours des dernières années, de nombreux grands fabricants d'éoliennes ont été touchés par de grands problèmes de pales, allant de défaillances catastrophiques jusqu'à des vastes campagnes de rénovation à cause de la nature du matériau utilisé, la taille de la pale et les conditions d'utilisation de ses dernières [67].

Il est donc plus que primordial de proposer des stratégies et des solutions pour remédier et réduire les risques de défaillances des pales, maximiser l'efficacité aérodynamique et la robustesse structurelle, ainsi que de réduire la masse de la pale et le coût total de fabrication en utilisant les matériaux composites.

Les caractéristiques mécaniques des composites sélectionnés sont déterminées après plusieurs essais de traction, compression, flexion, torsion, délaminage, flambage, fatigue, contrôle de fibres en volume, etc [68]. En prenant en compte les aspects environnementaux et sanitaires qui peuvent être caractérisés par une approche d'éco-caractérisation et des éco-efficience dans une vision d'éco-conception [69].

Selon les acteurs de l'industrie éolienne, la technologie des pales est la clef d'une exploitation efficace de l'énergie éolienne. En effet, les efforts actuels se concentrent sur le développement de pales intelligentes, durables et encore plus grandes que celles qui les ont précédées, avec une production d'énergie plus élevée [70].

Cependant, mis à part l'aspect aérodynamique de la pale, la configuration structurelle et la sélection des matériaux de fabrication sont l'un des aspects les plus importants de la conception des pales éoliennes. De telles structures nécessitent une grande rigidité, une simplicité d'assemblage et surtout un faible poids. Par conséquent, l'ingénieur doit constamment faire face à la difficulté de choisir le matériau qui réponde à ces exigences. En effet, la sélection d'un matériau adéquat ne réside pas seulement dans les propriétés mécaniques de ce dernier, telles que sa résistance, sa rigidité et sa ductilité, mais aussi en considérant ses propriétés physico-chimiques, esthétiques et économiques. L'un des progrès technologiques les plus prometteurs dans le domaine des matériaux de nos jours sont les « matériaux composites ».

2.3.3.1 Contribution des matériaux composites :

Selon la norme ASTM D3878, les composites sont des matériaux structuraux qui se composent de deux ou plusieurs constituants non miscibles combinés à l'échelle macroscopique. Le but de ce mélange est d'avoir un matériau dont les performances sont meilleures que celles de ses différents composants pris séparément. L'un des constituants est appelé « Renfort » et celui qui l'enveloppe est appelé « Matrice ». La phase de renfort fournit la majorité de la résistance et de la rigidité du composite. Elle peut être en forme de fibres, de particules ou d'écaille. La matrice représente, en général, la matière de liaison, qui soutient et protège la phase de renfort [71].

De nos jours, la technologie des composites a vu une expansion extraordinaire du fait des avantages remarquables qu'elle offre, à savoir : une haute résistance, une rigidité élevée, une longue résistance à la fatigue, une faible densité, une stabilité thermique et une grande adaptabilité aux fonctions que requière une structure [71]. Par conséquent, son utilisation prend de l'ampleur vis-à-vis des matériaux traditionnels, dans pratiquement tous les domaines industriels, tels que : l'aéronautique, l'aérospatial, les constructions automobiles et navales, le génie civil, etc. La **figure 2.20** illustre la structure interne de la pale d'une éolienne

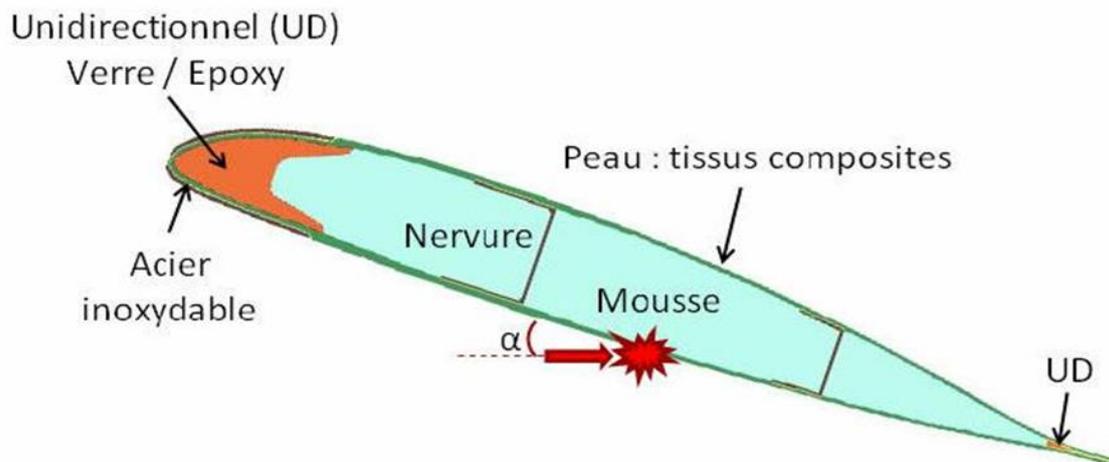


Figure 2.20 : Structure interne de la pale d'une éolienne [71].

2.3.3.2 Pales éolienne et matériaux composites :

Au début de l'utilisation des composites dans la fabrication des pales éoliennes, les fibres de verre étaient l'un des matériaux favoris. Cependant, comme les pales sont de plus en plus grandes, l'idée de remplacer les fibres de verre par des fibres de carbone commence à prendre forme. Nonobstant leur coût plus élevé, les fibres de carbone sont plus rigides et plus légères. Plusieurs fabricants de turbines éoliennes, tels que Vestas Wind Systems A/S et Gamesa Technology Corp, ont opté pour

l'utilisation des fibres de carbone dans les parties structurales de leurs pales (**tableau 2.5**) contrairement à Siemens (voir **figure 2.21**) qui utilise toujours des pales à base de fibre de verre. Du fait de la légèreté des fibres de carbone, les pales sont plus légères. Par conséquent, les tours sont moins lourdes et leur coût de fabrication est amoindri. Ainsi, le coût des fibres de carbone est compensé. Cependant, l'utilisation des fibres de carbone apporte de nouveaux défis de fabrication, tels que la précision d'alignement des fibres et la difficulté de moulage [72].



Figure 2.21 : Moule pour une pale éolienne Siemens en fibres de verre de 75 m [72].

Tableau 2.5 : Exemples de modèles de turbines éoliennes impliquant des pales en matériaux composites

Fabricant	Modèle	Longueur de la pale (m)	Rotor \varnothing (m)	P (MW)	Matériaux
Vestas	V136-3.45MW	66.7	136	3.45	Fibre de verre, longeron en carbone avec une coque de profil en fibre de
Enercon	E-126	-	127	7.5	Fibre de verre/Epoxy avec un maillage en acier contre la foudre
Siemens	SWT-3.6-120	58.5	120	3.6	Fibre de verre/Epoxy
Gamesa	G136-4.5 MW	66.5	136	4.5	Fibre de verre et de carbone/matrice organique
Suzlon	S88-2.1MW	-	88	2.1	Fibre de verre/Epoxy

Afin de relever le défi avec la prochaine génération des turbines éoliennes, de grandes espérances sont placées sur les matériaux et la conception des structures des futures pales. En effet, le développement de pales composites innovantes et intelligentes implique une interaction entre les paramètres influençant le comportement d'une structure de telle envergure, à savoir : le choix des matériaux adéquats, les procédés de fabrication et la conception structurale.

2.3.4 L'évolution des éoliennes :

Ces dernières années, les éoliennes ont connu une nette évolution, qu'elles soient Onshore ou Offshore par rapport à leur taille, et le lieu de leur implantation

2.3.4.1 Les éoliennes Offshore :

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Le terme anglais « offshore » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « onshore ».

Les éoliennes offshores fonctionnent selon le même principe que les modèles terrestres traditionnels : elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur [73].

Les éoliennes offshores représentées dans la **figure 2.22**, sont spécialement conçues pour résister à la corrosion. Elles possèdent également des capteurs spécifiques pour un contrôle accru. La nacelle et la tour sont équipées de systèmes de contrôle et de régulation de l'humidité et de la température pour éviter tout risque de corrosion interne. La nacelle est équipée de deux grues hydrauliques permettant la manutention d'outils et de pièces de rechange en tout point de l'éolienne.



Figure 2.22 : Ferme éolienne off-shore [73].

2.3.4.2 L'évolution des installations éoliennes :

Si les premiers prototypes d'éoliennes offshore étaient de simples copies des éoliennes terrestres, les machines se sont peu à peu adaptées à la mer. Les développements technologiques actuels, et en particulier l'évolution attendue des machines en taille et en puissance, sont d'ailleurs caractéristiques des éoliennes offshore (**figure 2.23**).

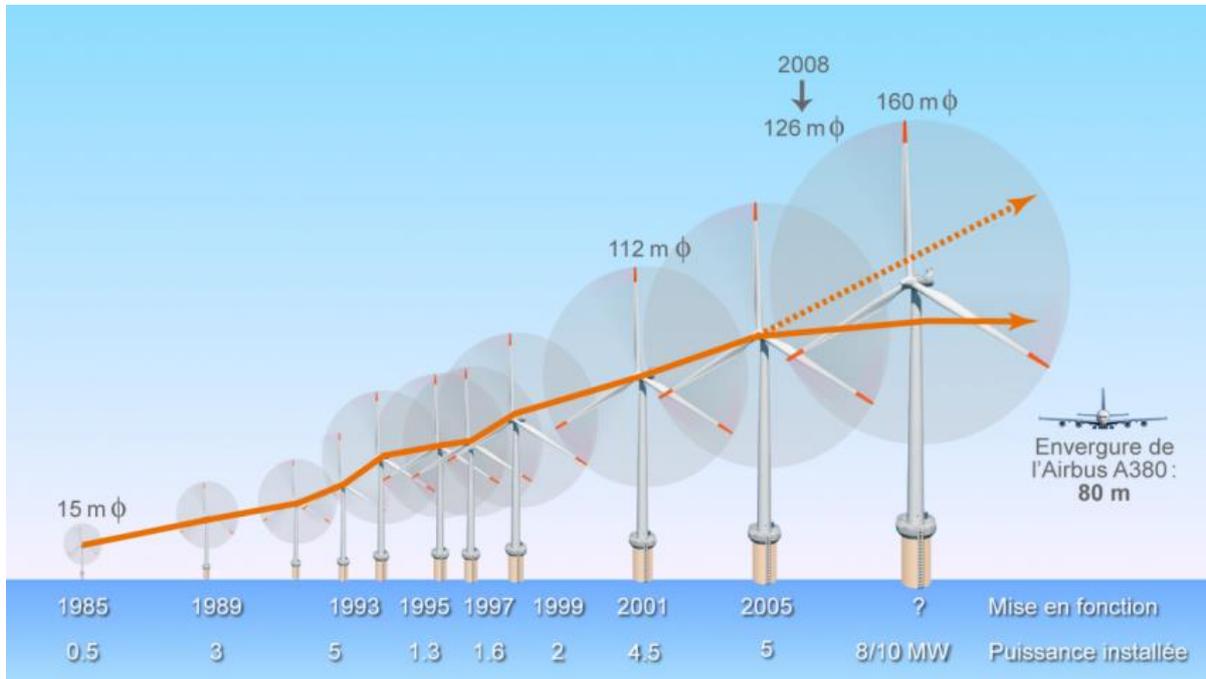


Figure 2.23 : Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore (©Connaissance des Énergies) [73].

Les éoliennes offshore se différencient également de plus en plus des éoliennes terrestres par leur conception technique adaptée au milieu marin. Si elles ont le même aspect, leurs conditions de fonctionnement sont différentes. Les fondations marines sont l'aspect le plus notable de leurs particularités puisqu'elles doivent être ancrées ou enfoncées dans le fond marin. Elles doivent également résister à la corrosion, aux tempêtes et aux efforts créés par les masses d'eau alentour.

2.3.4.3 La rupture technologique attendue de l'éolien flottant farshore :

Les premiers projets éoliens off-shore ont consisté à installer des éoliennes en eaux peu ou moyennement profondes, de 5 à 40 mètres de profondeur. Au-delà il est difficile et très coûteux de planter l'éolienne dans le fond marin ou de déposer sa base. S'affranchir de la contrainte de la profondeur d'eau est une piste intéressante, surtout dans les pays comme la France où les profondeurs dépassent rapidement les 40 mètres lorsque l'on s'éloigne de la côte.

Fin 2017, la profondeur moyenne des parcs éoliens en mer dans les eaux européennes était de 27,5 m, ceux-ci étant en moyenne situés à 41 km des côtes.

Des projets d'éoliennes flottantes farshore (**figure 2.24**), situées à plusieurs kilomètres des côtes à plus de 50 mètres de profondeur, offrent des perspectives intéressantes, contrairement aux éoliennes offshore traditionnelles, leurs fondations ne sont pas enfoncées dans le fond marin mais ancrées au moyen de câbles. C'est pourquoi leur installation est simplifiée et les besoins en matériaux grandement diminués [74].



Figure 2.24 : éolienne flottante farshore [74].

2.3.4.4 Avantages et inconvénients de la technologie éolienne offshore

- La technologie de l'éolien offshore a bénéficié d'une grande partie des avancées technologiques récentes de l'éolien terrestre, une des énergies renouvelables les plus matures.
- La mer étant plane, les vents rencontrent moins d'obstacles et sont par conséquent plus soutenus, plus réguliers et moins turbulents que sur terre. A puissance égale, une éolienne offshore peut produire jusqu'à 2 fois plus d'électricité qu'une éolienne terrestre.
- La mer offre de grands espaces libres d'obstacles, où l'implantation des machines est possible, sous réserve de concertation avec les autres usagers de la mer.

2.3.4.5 Limites rencontrées pour leur exploitation :

- Les investissements initiaux dans des projets éoliens offshore sont très sensiblement plus élevés à ceux dans des projets à terre, notamment en raison des coûts additionnels liés aux fondations et au raccordement.
- Bien que les vents soient plus constants en mer que sur terre, l'énergie éolienne offshore est également intermittente.
- L'éolienne est soumise mécaniquement non seulement aux efforts du vent sur les pales et la structure, mais aussi aux efforts créés par les courants d'eau.
- L'installation des éoliennes en mer est plus compliquée que sur terre. Des bateaux adaptés doivent être employés. La maintenance des éoliennes est également plus compliquée et plus coûteuse qu'à terre. Si une panne survient, il peut se passer plusieurs jours avant la réparation, ce qui entraîne une perte de production.
- Le raccordement électrique nécessite l'installation de câbles sous-marins jusqu'à la côte qui peut être distante de plusieurs kilomètres. Pour les grandes distances, il faut recourir à un acheminement en courant continu et associer des convertisseurs électroniques de puissance afin d'atténuer les pertes d'électricité

2.3.4.6 Eolienne sans pales :

Une éolienne sans pale est un dispositif permettant la production d'énergie éolienne, qui se caractérise par une absence du système rotatif présent sur le modèle conventionnel. Elle permet d'exploiter la force cinétique du vent afin de la transformer en énergie électrique. Cependant, les prototypes développés ne présentent pas la même structure, bien que l'absence des pales soit commune à tous ces modèles. Certains d'entre eux seront reliés au sol par la présence de mâts verticaux tandis que d'autres sont conçus comme des systèmes de poche. De nombreuses différences existent donc entre ces éoliennes qui se distinguent des éoliennes actuelles [75].

Cette conception présente de nombreux avantages par rapport à une éolienne classique : faible coût d'entretien (grâce notamment à une moindre usure mécanique des composants), un poids réduit de 80 % et une empreinte au sol inférieure de 50 %. Elle est aussi plus silencieuse, sans danger pour les oiseaux, et ne perturbe pas le paysage.

Bien entendu, sa capacité de production est très inférieure à celles des immenses turbines qui ornent les côtes. Une colonne d'environ 3 mètres de haut ne génère qu'une puissance de 100 watts. Mais cela peut être compensé par un plus grand nombre d'éoliennes, puisque l'éolienne sans pales nécessite moins de place. Ces éoliennes pourraient être conçues pour fournir l'équivalent de la production de 20 mètres carrés de panneaux solaires et alimenter les lampadaires ou le réseau électrique local [76]. La **figure 2.25** illustre une éolienne sans pales.



Figure 2.25 : L'éolienne sans pales : un moyen alternatif et innovant d'exploiter l'énergie du vent [76].

2.3.4.7 Eolienne Wind Belt :

L'éolienne Wind Belt a été proposé par Frayne en 2004 et a été étudié par plusieurs chercheurs. Les trois mécanismes les plus utilisés pour la récolte de l'énergie du vent à petite échelle sont les méthodes électromagnétiques, piézoélectriques et électrostatiques. Ces trois mécanismes partagent un principe de fonctionnement commun qui consiste à convertir les vibrations en une énergie électrique utilisable (courant électrique) [77].

L'éolienne Wind Belt se focalise sur les vibrations générées par le battement de la courroie selon un effet appelé "battement aéroélastique". Le battement aéroélastique capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en vibrations qui vont auto-alimenter la structure élastique de l'éolienne Wind Belt. Ce mouvement relatif provoque un changement du champ magnétique, également appelé flux magnétique, ce qui génère de l'électricité sous forme de courant électrique. Ce type d'éolienne peut récolter des vents de faibles vitesses dans toutes les directions.

Plusieurs paramètres, tels que les matériaux, la dimension et la tension de la courroie, peuvent affecter les performances de l'éolienne Wind Belt. La **figure 2.26** suivante illustre les composants de cette éolienne.

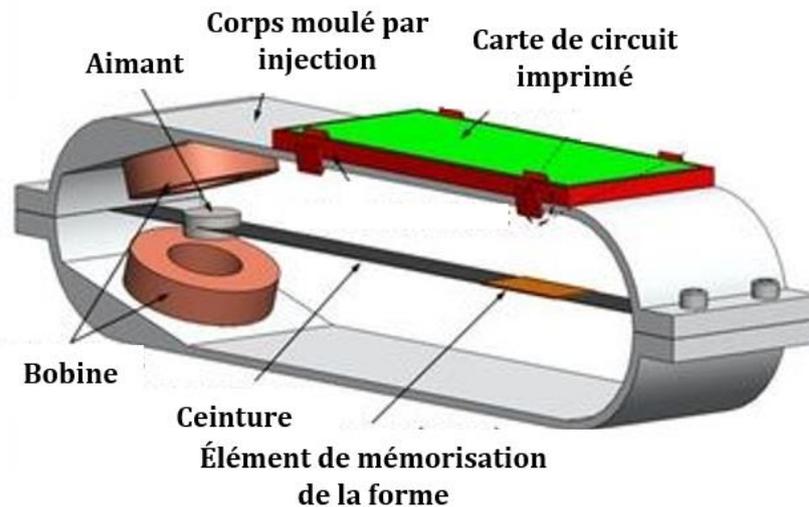


Figure 2.26 : Les composants de l'éolienne Wind Belt [77].

2.3.4.8 Eolienne volante :

L'énergie éolienne aéroportée concerne la production d'énergie utilisable par des dispositifs aéroportés (éoliennes volantes). Contrairement aux éoliennes avec des mats, les systèmes éoliens aéroportés volent librement dans l'air ou sont reliés au sol par un filin, comme les cerfs-volants ou les ballons captifs. Il s'avère que tous les systèmes éoliens aéroportés ayant une production d'énergie significative sont reliés mécaniquement au sol afin d'exploiter la vitesse relative entre la masse d'air et le sol ; en fait, pour pouvoir récolter l'énergie du vent, ces éoliennes doivent maintenir une force importante contre ce mouvement [78]. Elles peuvent être reliées à une station terrestre fixe ou à un autre objet mobile, mais non volant, comme un véhicule terrestre ou maritime. L'énergie est générée sous forme de force de traction, par exemple pour un véhicule en mouvement, ou sous forme d'électricité. Les trois principales raisons pour lesquelles les gens s'intéressent à l'énergie éolienne aéroportée pour la production d'électricité sont les suivantes :

- Contrairement aux éoliennes au sol, les dispositifs éoliens aéroportés pourraient être en mesure d'atteindre des altitudes plus élevées, exploitant ainsi une ressource éolienne importante et jusqu'à présent inutilisée.

- Les vents en altitude sont généralement plus forts et plus réguliers que ceux qui soufflent près du sol, que ce soit sur ou en dehors des côtes.
- Et surtout, les systèmes éoliens aéroportés pourraient nécessiter moins d'investissement matériel par unité de puissance utilisable que la plupart des autres sources d'énergie renouvelables. Ce rapport puissance/masse élevé promet de rendre possible le déploiement à grande échelle de la technologie à des coûts comparativement faibles.

La **figure 2.27** illustre une éolienne volante aéroportée



Figure 2.27 : Eolienne volante (Aéroportée) [78].

2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné un bref aperçu à propos des dernières technologies utilisés dans le secteur des énergies renouvelables en particulier le solaire photovoltaïque et éolien, c'est un secteur très prometteur car ces nouvelles technologies apporteront un surplus et un gain en productivité, efficacité, durabilité et fiabilité, commençant par une énumération des technologies utilisés dans le solaire photovoltaïque (Matériaux des cellules solaire photovoltaïques : bifacialité – Demi cellules – Cellules busbars – Cellules bi-verre) pour ensuite aborder les technologies les plus récentes en terme de conception, d'innovation et de trouvailles dans le secteur éolien (Innovation VAWT – les nouveaux matériaux et composites utilisés dans la conception des pales – Eoliennes Offshore et Farshore – Eoliennes sans pales – Wind Belt - Volantes)

Cette approche ouvre lieu aux perspectives futures dont peuvent aboutir ces nouvelles technologies que l'on espère voir se développer à l'échelle industrielle dans un très court avenir.

CHAPITRE 03 :
Optimisation,
modélisation et
dimensionnement
du SEHR

3.1 Introduction

Les caractéristiques de l'énergie produite par les systèmes photovoltaïques (PV) et éoliens dépendent des conditions météorologiques. Ces systèmes ne sont pas fiables sans dispositifs de stockage de capacité suffisante comme les batteries ou les systèmes d'appoint comme les générateurs diesel conventionnels.

L'efficacité d'un système augmente de manière significative lorsque les deux systèmes sont hybridés avec l'intégration d'un dispositif de stockage. Afin de surmonter le problème d'intermittence, certains paramètres de conception doivent être pris en compte. Malheureusement cette approche génère un coût supplémentaire au système. A cet effet, l'introduction de l'optimisation du système énergétique hybride (SEH) est nécessaire dans divers domaines tels que le dimensionnement des composants du système, la gestion de l'énergie, les conditions météorologiques imprévues, la répartition de l'énergie excédentaire et le stockage de l'énergie.

La complexité des modèles de composants des systèmes hybrides dépend principalement du type d'application. Dans les SEH, il doit y avoir un meilleur compromis entre la fiabilité de l'alimentation et le coût du système. La nature intermittente de l'énergie hybride mène au surdimensionnement des unités individuelles, ce qui augmente le coût du système. Beaucoup d'autres paramètres comme la qualité de l'énergie, la stabilité du système, l'utilisation efficace de l'énergie excédentaire et autres doivent être contrôlés pour une meilleure performance du système [79] [80].

Dans cette vision, ce chapitre a pour objectif de donner un bref aperçu sur les méthodes d'optimisations les plus couramment utilisées pour le dimensionnement de SEH avant de passer à une modélisation de chaque composant du système proposé, ensuite nous nous étalerons sur la méthode choisie, son principe de fonctionnement et l'algorithme la régissant.

3.2 Métriques de l'énergie hybride

Au cours de la conception des SEHR, un critère important est de sélectionner correctement les sources d'énergie tout en respectant plusieurs indicateurs de performance. Ceci mène à une allocation optimisée des sources d'énergie qui conduira à un taux de fiabilité, efficacité, faisabilités élevées et à un coût d'énergie plus faible.

Il existe plusieurs indicateurs de performance pour les systèmes énergétiques hybrides, qui peuvent nous aider à évaluer leurs fiabilités et/ou leurs faisabilités. A cet effet ; le concepteur peut dimensionner de manière adéquate les composants du système.

La classification des indicateurs de performance les plus répandus a été donné par [27] comme le montre clairement la **figure 3.1**. De toute évidence, le facteur de coût reste la variable de conception la plus répandue, son affectation représentant 84%. Il y a d'autres indicateurs importants qui sont liés aux contraintes pratiques comme la configuration adéquate et le taux de participation de chaque élément de cette configuration. Ainsi que les paramètres de demande de la charge, l'énergie produite et les contraintes environnementales.

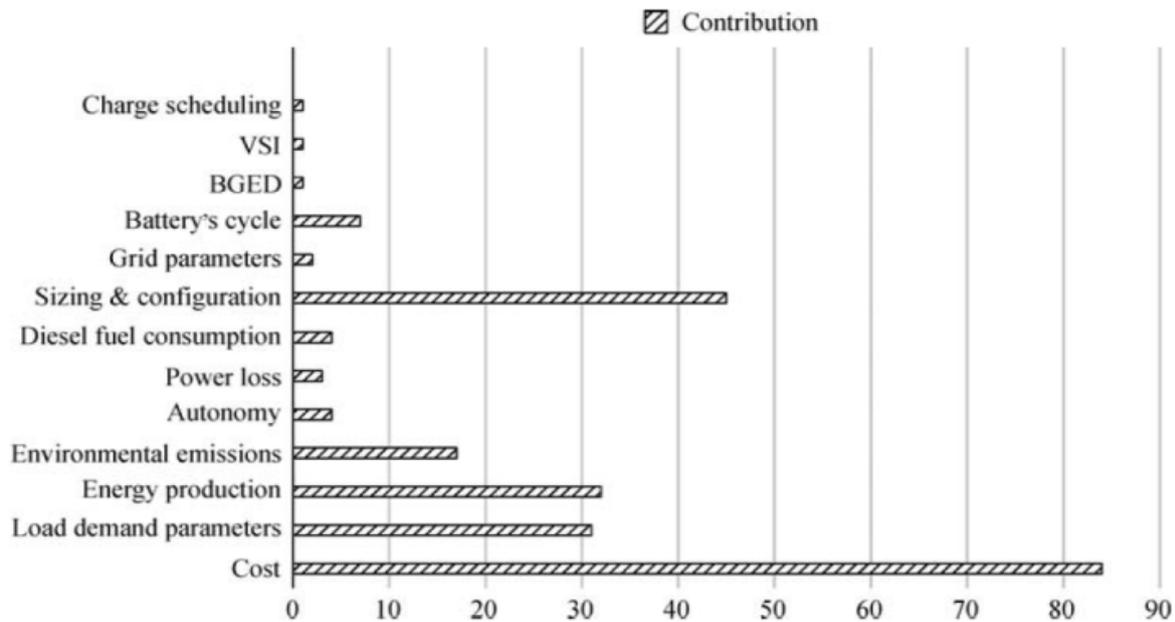


Figure 3.1 : Indicateurs de performance pour les systèmes énergétiques hybrides [27].

3.3 Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

Le dimensionnement et la configuration ont également contribué à la majorité des travaux de recherche sur la production multi-sources. Plusieurs méthodologies de dimensionnement ont été utilisées dans la littérature afin de concevoir les SEH. La manière la plus simple de les classer est de le faire en fonction de leur niveau de complexité, comme le montre la **figure 3.2**.

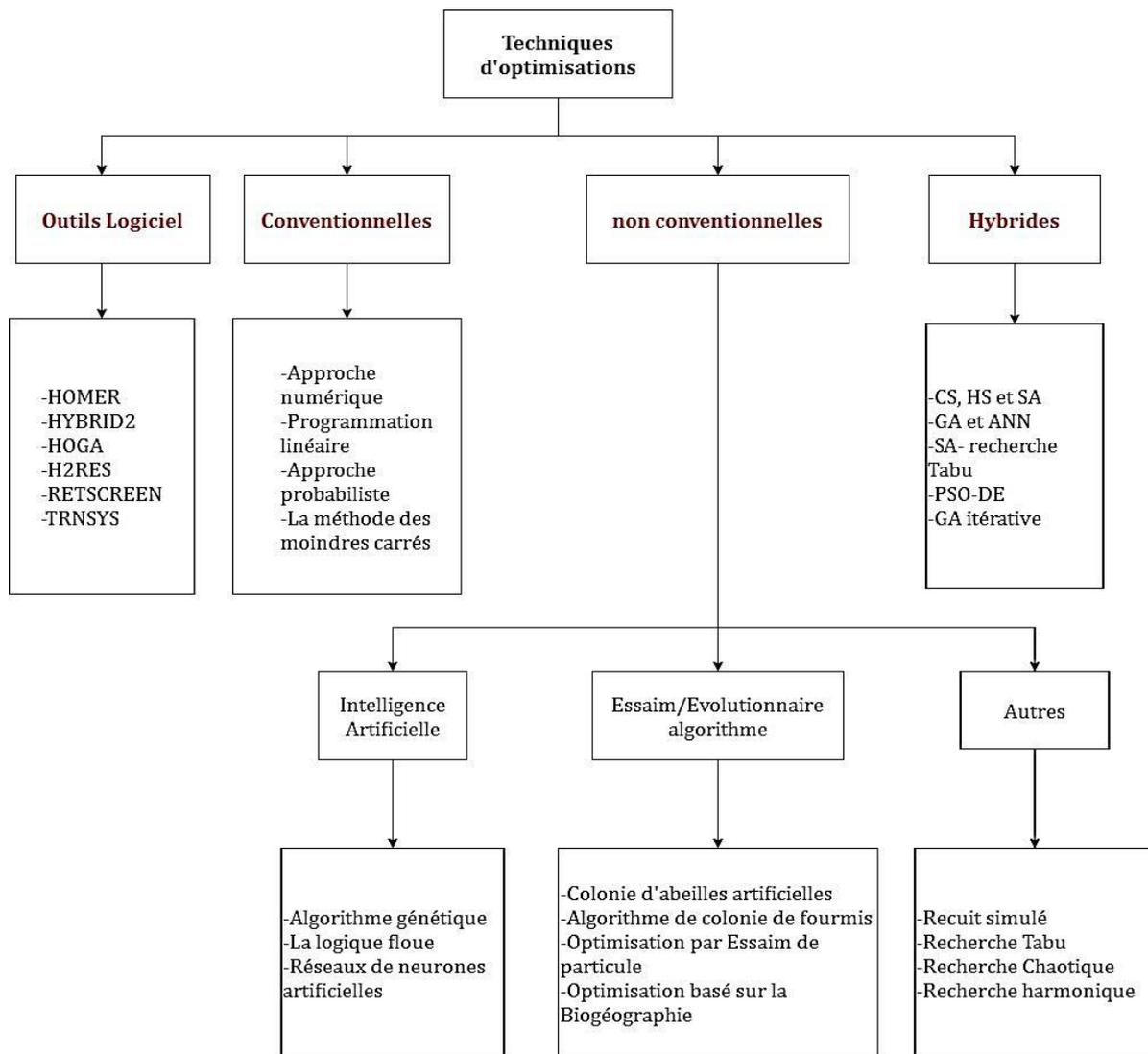


Figure 3.2 : Diagramme regroupant différentes méthodes d'optimisation [27].

Les techniques résumées dans le diagramme sont :

3.3.1 Outils logiciels :

Il ressort de la littérature que les outils logiciels commercialisés les plus utilisés sont **HOMER** (Hybrid optimization method for electric renewable) et **HOGA** (Hybrid optimization by genetic algorithm)

3.3.2 Techniques conventionnelles :

Différentes méthodes conventionnelles sont appliquées pour obtenir les configurations optimales des systèmes hybrides. Les méthodes appliquées par différents sont :

- La méthode de construction graphique,
- La méthode des moindres carrés,

- Les approches itératives et probabilistes,
- La programmation linéaire et la programmation linéaire en nombres entiers mixtes.

Ces techniques sont simples à utiliser, faciles à comprendre et possèdent un large éventail d'applications.

3.3.3 Techniques d'optimisation non conventionnelles :

Les problèmes d'optimisation d'ingénierie à grande échelle ont créé un besoin de techniques d'optimisation alternatives. En particulier, les algorithmes évolutionnaires bio-inspirés sont appliqués aux problèmes d'optimisation à grande échelle pour obtenir une solution optimale avec une simplicité de calcul moindre. Ces algorithmes sont inspirés de l'évolution naturelle ou du comportement social des espèces. Parmi ces techniques on peut citer :

- Algorithme génétique,
- Optimisation par essaims de particules,
- Optimisation basée sur la biogéographie,
- Optimisation par colonies de fourmis,
- Algorithme de la colonie d'abeilles artificielles,
- Recuit simulé ou simulated annealing,

3.3.4 Autres techniques :

Avec les progrès des nouveaux algorithmes, plusieurs approches non conventionnelles ont été mises en œuvre ces dernières années dans les systèmes hybrides pour le dimensionnement et l'amélioration de la fiabilité de ces derniers. Une nouvelle tendance a été observée dans la croissance des algorithmes d'optimisation parmi lesquelles on peut citer :

- Techniques hybrides,
- Optimisation multi-objectifs,
- Algorithmes méta-heuristiques
- Optimisation basée sur l'intelligence artificielle,

3.4 Les techniques et algorithmes les plus couramment utilisées dans les SEHR :

Au cours de la dernière décennie, il y a eu une croissance et un intérêt significatifs dans le développement d'outils et de méthodes qui sont utilisés pour optimiser les performances et l'efficacité des systèmes hybrides en utilisant les derniers modèles de calcul. Ces outils, visent à aider le concepteur à analyser l'intégration de plusieurs sources renouvelables. La **figure 3.3** illustre la diversité des méthodes et algorithmes d'optimisation courants qui ont été utilisés pour la conception des SEHR. La **figure 3.4** représente le pourcentage de partage des techniques dans la littérature publiée au cours des 10 dernières années [80]. De toute évidence, HOMER est l'outil

le plus courant, sa contribution étant de 25%. D'autres méthodes couramment utilisées pendant la conception et l'optimisation des SEHR sont GA, PSO, MILP, SA et l'optimisation itérative.

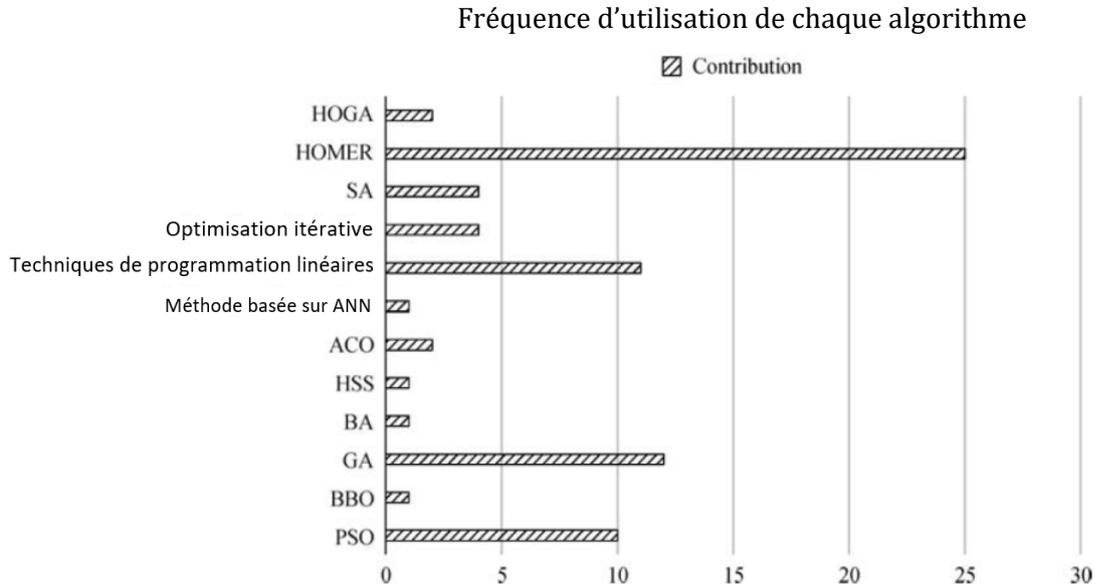


Figure 3.3: Contribution des algorithmes et méthodes d'optimisation les plus communément utilisés [27].

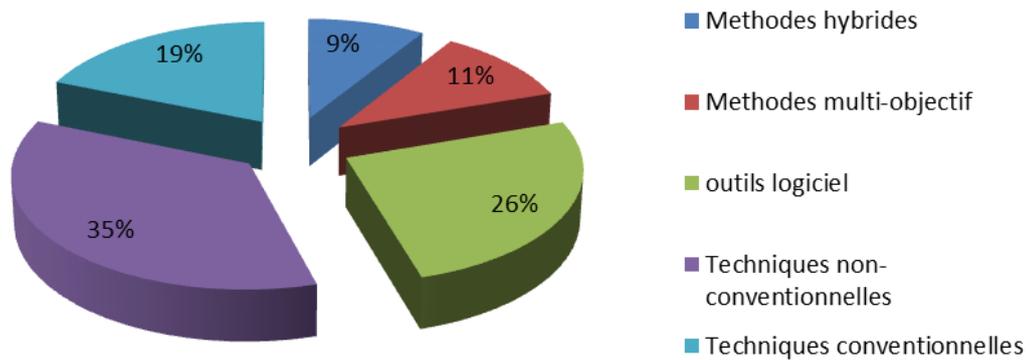


Figure 3.4: Fréquence d'utilisation des techniques dans la littérature publiée au cours des 10 dernières années [80].

Chaque technique et outil d'optimisation possède ses propres caractéristiques et son propre potentiel pour promouvoir de manière significative l'applicabilité de la production d'énergie renouvelable. On peut conclure que même si beaucoup de méthodes d'optimisation sont disponibles, il y a beaucoup plus d'approches qui peuvent être appliquées pour rendre le système d'énergie hybride plus économique et efficace.

3.5 Modélisation des composants du SEHR :

Le dimensionnement optimal du SEHR exige une bonne maîtrise des générateurs qui le composent. Ainsi chaque composant du système doit être bien évalué et modélisé mathématiquement.

Dans les sections à venir, nous allons procéder à la modélisation et l'évaluation des différentes sources utilisées dans ce travail. Permettant ainsi, un bon choix des générateurs de notre système énergétique hybride.

3.5.1 Modélisation du générateur photovoltaïque :

Comme nous l'avons vu, un module PV est constitué d'un certain nombre de cellules PV. Une cellule PV est construite à partir d'un matériau à homo-jonction p-n. Un semi-conducteur dopé de type p est joint à un semi-conducteur dopé de type n, et une jonction p-n est formée. Si les semi-conducteurs de type p et de type n ont la même énergie de bande interdite, une homo-jonction est formée. Ces types de semi-conducteurs ont des bandes interdites égales, et ils ont normalement un dopage différent. L'absorption de photons d'énergie génère du courant continu. Lorsque l'énergie du rayonnement du soleil est reçue par le module, celui-ci se charge en énergie électrique. Le modèle d'une cellule PV est similaire à celui d'une diode et peut être exprimé par l'équation bien connue de Shockley-Read. Le module PV peut être modélisé par un modèle exponentiel simple.

L'équation (3.1) [81] présente le modèle exponentiel simple avec la source de courant et la tension de sortie en fonction de la température. La source de courant, I_{ph} , en parallèle avec la résistance shunt, R_{sh} , décrit le modèle PV. Le courant traversant la résistance shunt est désigné par I_p . La tension continue de sortie, V , est en série avec la résistance interne, R_s . Le modèle PV décrit également la perte de puissance due au courant, I_D , circulant dans la diode :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT_{ck}} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad \text{Eq (3.1)}$$

- " I_0 " est le courant de saturation de la diode (A),
- " V " est la tension de la cellule (V),
- " q " est la charge électronique ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Coul.),
- " n " est la constante d'idéalité de la diode,
- " k " est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),
- " T_{ck} " est la température de la cellule.
- " I " est le courant débité par la cellule (A)

La figure 3.5 présente un modèle standard d'une cellule photovoltaïque.

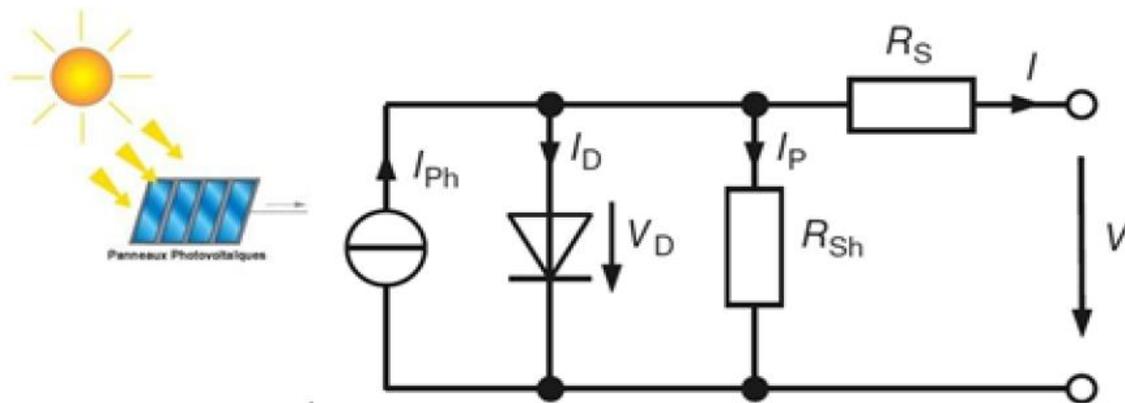


Figure 3.5 : Modèle standard d'une cellule photovoltaïque [81].

La puissance produite d'un générateur photovoltaïque exprimée en (W) peut être calculée grâce à l'équation suivante :

$$P_{pv}(t) = \eta S G(t) \quad \text{Eq (3.2)}$$

Où :

- η : Le rendement instantané du module photovoltaïque calculé par l'équation (3.3)
- S : La surface du module PV (m^2)
- G : L'éclairement global sur un plan incliné exprimé en (W/m^2)
- $P_{pv}(t)$: La puissance fournie par le champ PV pour chaque instant t (W)

$$\eta = \eta_r \cdot (1 - \gamma \cdot (T_c - T_0)) \quad \text{Eq (3.3)}$$

Où :

- η_r : Le rendement de référence du module photovoltaïque sous les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $AM=1,5$)
- γ : Coefficient de température ($^\circ\text{C}$) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de 1°C de la température de la cellule. Il varie entre 0,004 et 0,006 ($^\circ\text{C}$)
- T_0 : La température standard ($^\circ\text{C}$)
- T_c : La température de la cellule, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante. Elle peut être décrite par la relation suivante :

$$T_c = T_a + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) G(t) \quad \text{Eq (3.4)}$$

Avec :

- *NOCT*: (Nominal Operating Cell Temperature) La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire $^\circ\text{C}$
- T_a : La température ambiante ($^\circ\text{C}$)

Ainsi, la puissance totale du champ photovoltaïque s'écrit comme suit :

$$P_{pvt}(t) = N_{pv} \cdot P_{pv}(t) \quad \text{Eq (3.5)}$$

Avec :

- $P_{pv}(t)$: La puissance totale fournie par le champ PV (W)
- N_{pv} : Le nombre de panneaux PV total

• Choix du module photovoltaïque :

Le choix du type de panneau (Zytech solar) [82] est du fait qu'il est l'un des meilleurs constructeurs de panneaux photovoltaïques au monde, réputé par sa bonne qualité avec un très bon rapport (qualité/prix), ce panneau s'avère le bon candidat pour notre cas. Sa puissance crête est choisie surtout pour le bon rendement instantané qui lui est attribué. Le panneau est aussi choisi selon la tension maximale et le courant admissible que pourra supporter le régulateur de charge. On note aussi le type envisagé dans cette étude qui est un poly-cristallin suite à son prix relativement inférieur par rapport à celui d'un panneau de type monocristallin.

Le **tableau 3.1** ci-dessous présente les caractéristiques du panneau photovoltaïque ZT300P

Tableau 3.1 : Caractéristiques du module ZT300P.

Constructeur	Zytech Solar
Référence	ZT300P
Courant de court-circuit I_{cc} (A)	8,59
Tension circuit ouvert V_{co} (V)	45,04
Courant au point maximum I_{mp} (A)	7,95
Tension au point maximum V_{mp} (V)	37,73
Surface des cellules (m^2)	1,752192
NOCT ($^{\circ}C$)	47
Température standard (C°)	25
Rendement du module (%)	17,12
Prix d'unité (€)	46,2

La **figure 3.6** illustre le modèle du panneau photovoltaïque choisi.

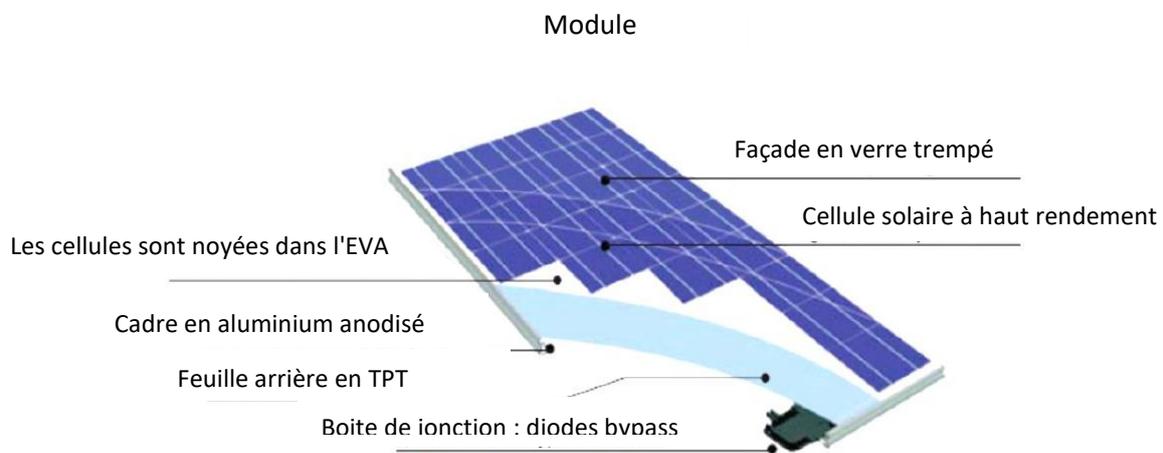


Figure 3.6 : Panneau solaire Zytech Solar ZT300P [82].

Le choix du module polycristallin est dû au fait que le site où s'est portée notre étude présente des températures élevées en été qui peuvent dépasser les $40^{\circ}C$. La puissance des panneaux sera plus importante dans cette zone contrairement au monocristallin. Et d'un point de vue économique son prix est nettement inférieur à celui du monocristallin ce qui le rend compétitif et idéal pour notre site.

3.5.2 Modélisation du générateur éolien :

Des chercheurs ont proposé un modèle très simple pour prédire la performance de l'éolienne. Ils ont supposé que la puissance de sortie de la turbine éolienne augmente linéairement avec la vitesse du vent du démarrage à la vitesse du vent nominale, puis elle reste constante jusqu'à la vitesse maximale. En conséquence, les équations caractéristiques suivantes ont été proposées pour la modélisation de l'éolienne :

$$P_{eol} = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_d \\ P_{Neol} \frac{V - V_d}{V_n - V_d} & \text{pour } V_d \leq V \leq V_n \\ P_{Neol} & \text{pour } V_n \leq V \leq V_c \\ 0 & \text{pour } V > V_c \end{cases} \quad \text{Eq (3.6)}$$

Où :

- V : La vitesse du vent pour chaque heure (m/s)
- V_d : La vitesse de démarrage (m/s)
- V_n : La vitesse nominale de l'éolienne (m/s)
- V_c : La vitesse crête (m/s)
- P_{Neol} : La puissance nominale de l'éolienne
- P_{eol} : La puissance fournie par l'éolienne

• Choix de l'éolienne :

L'éolienne choisie est une éolienne à axe horizontale du constructeur SUN de référence SUN-800 qui ne nécessite pas une grande vitesse de vent pour le démarrage et ce vu le faible potentiel de vent du site où notre étude a été portée.

C'est une éolienne de 6 pales avec une génératrice synchrone qui dispose d'un régulateur/contrôleur de charge MPPT qui est fourni avec le kit, la tension de sortie de cette éolienne est de 48V DC elle sera donc connectée au bus CC dans notre SEHR.

Le **tableau 3.2** ci-dessous présente les caractéristiques de l'éolienne SUN-800 [83]

Tableau 3.2 : Caractéristiques de l'éolienne SUN-800

Constructeur	SUN
Puissance nominale	800 W.
Puissance nominale	850 W.
Tension nominale	48 V.
Longueur des lames	580 mm.
Poids net supérieur	10 kg.
Diamètre de la roue	1,1 m
Vitesse du vent nominale (m/s)	13 m/s.
Vitesse de démarrage	1,3 m/s
Vitesse du vent de survie	40 m/s.
Durée de vie	Plus de 20 ans
Matériau de la coque	Alliage d'aluminium
Température de fonctionnement	De -40 à 80 °C.
Prix de l'unité	219,00€

La **figure 3.7** illustre l'éolienne choisie pour notre étude.



Figure 3.7 : Eolienne SUN-800 à 6 pales [83].

3.5.3 Modélisation du système de stockage :

Le système de stockage d'énergie est soigneusement dimensionné pour répondre à la demande de la charge dans les moments d'indisponibilité ou d'insuffisance de l'énergie dans un système hybride. Le dimensionnement de la batterie dépend des facteurs tels que la profondeur maximale de la décharge, la correction de la température, la capacité nominale de la batterie et la durée de vie de la batterie. La capacité de la batterie requise en ampère heure peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$B_{rc} = \frac{E_c \cdot D_s}{DOD_{max} \cdot \eta_t} \quad \text{Eq (3.7)}$$

Où :

- B_{rc} : Capacité de batterie requise (Ah)
- E_c : La charge en ampères-heure (Ah)
- D_s : Les jours d'autonomie de la batterie
- DOD_{max} : La profondeur maximale de décharge de la batterie (Pour la batterie à décharge profonde DOD maximale est de 75%)
- η_t : Le facteur de correction de la température

Lorsque la production totale du système hybride est supérieure à la demande en énergie, le système de stockage est en état de charge. Sinon il est en état de décharge. La quantité de charge de la batterie à l'instant t peut être calculée en utilisant l'équation [84] :

$$Eb(t) = Eb(t - 1) \cdot (1 - \sigma) + \left(E_{GA}(t) - \frac{E_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \right) \eta_{bat} \quad \text{Eq (3.8)}$$

Où

- $Eb(t)$ et $Eb(t - 1)$ sont les quantités de charge des batteries à l'instant t et (t - 1)
- $E_{GA}(t)$ est l'énergie totale générée par la source d'énergie renouvelable, après la perte d'énergie dans le contrôleur,
- $E_{ch}(t)$ est la demande de la charge à l'instant t,
- η_{inv} et η_{bat} sont le rendement de l'onduleur et celui de la charge de la batterie,
- σ est le taux d'autodécharge qui dépend de la charge accumulée et l'état de la batterie.

La quantité de charge de la batterie est soumise à des contraintes telles que :

$$Eb_{min} \leq Eb(t) \leq Eb_{max} \quad \text{Eq (3.9)}$$

Où Eb_{max} et Eb_{min} sont la quantité de charge maximale et minimale de la batterie.

- **Modélisation de l'EDC**

La modélisation de l'état de charge de la batterie est nécessaire afin de mieux gérer le stockage d'énergie. Cette opération dépend de l'état de charge précédent et l'énergie produite par les différents types de générateurs E_{pr} ainsi que l'énergie demandée par la charge E_{ch} . L'état de chargement des batteries EDC peut être calculé selon deux scénarios [84].

- **Premier scénario (Charge)** : Dans le cas où l'énergie produite par les générateurs renouvelables est supérieure ou égale à l'énergie demandée $E_{pr} > E_{ch}$, les batteries se chargent. La capacité de stockage instantanée $EDC(t)$ en (W) est donnée par la formule suivante :

$$EDC(t) = EDC(t - 1) + \eta_{bat} \left(E_{pr}(t) - \frac{E_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \right) \quad \text{Eq (3.10)}$$

Où

- $E_{ch}(t)$: L'énergie instantanée demandée par la charge (W)
- $E_{pr}(t)$: L'énergie totale produite par les générateurs du système hybride à l'instant t , donnée par :

$$E_{pr}(t) = E_{pv}(t) + E_{eo}(t) \quad \text{Eq (3.11)}$$

Avec

$$\begin{cases} E_{pv}(t) = P_{pv}(t) \times \Delta t \\ E_{eo}(t) = P_{eo}(t) \times \Delta t \end{cases} \quad \text{Eq (3.12)}$$

Sachant que :

- Δt : Le pas de simulation égale à (1h)
- η_{bat} : Le rendement des batteries
- η_{conv} : Le rendement du convertisseur
- **Deuxième scénario (Décharge)** :

Maintenant dans le cas où l'énergie produite est inférieure à l'énergie demandée par la charge $E_{pr} < E_{ch}$ les batteries se mettent dans le processus de décharge. La capacité de stockage est instantanée $EDC(t)$ est donnée par l'expression suivante :

$$EDC(t) = EDC(t - 1) + \eta_{bat} (E_{pr}(t) - E_{ch}(t)) \quad \text{Eq (3.13)}$$

- **Choix de la batterie :**

Particulièrement performante, la batterie lithium ion permet de restituer au réseau l'électricité produite par un SEHR mais non consommée. Recyclable à 70% et très résistante, elle s'impose de plus en plus dans les nouvelles installations hybrides.

Notre choix s'est porté sur une batterie de marque Felicity Solar, de référence LPBG-48250 [85] ces caractéristiques sont mentionnées dans le (**tableau 3.3**) suivant :

Tableau 3.3 : Eolienne SUN-800 à 6 pales

Marque	Felicity Solar
Nom	Solar batteries lifepo4 lithium ion
Référence	LPBG-48250
Poids	136KG
Type	48200 Batterie 10.24KWH
Tension	48V
Profondeur de décharge	60%
Certification :	UN/MSDS
Cycle de vie	>3000 Cycles
Tension nominale	51.2V
Tension de charge	57.6V
Courant max charge/décharge	120A
Courant nominal charge/décharge	80A
Connexion	1-9 Parallèle
Garantie	2 ans
Prix de l'unité	1015€

La batterie solaire en lithium est un dispositif de stockage qui procure de nombreux avantages :

- La batterie lithium ion offre un excellent rendement. Pour notre modèle, ce rendement est supérieur à 95 %.
- La conception de la batterie lithium ion lui procure un nombre important de cycles de charge et de décharge. En moyenne, la batterie réalise plus de 3000 cycles de charge et de décharge à 60%.
- La batterie lithium ion est 2.5 fois plus légère qu'une batterie classique ce qui la rend très avantageuse pour les applications en site isolé.

- L'énorme atout de la batterie ion, elle n'utilise aucun matériau dangereux ou toxique. Contrairement aux idées reçues, le lithium est un métal complètement inoffensif ce qui n'est pas le cas du plomb qui est extrêmement coûteux à produire et à recycler. Par ailleurs, aucun gaz n'émane de cette batterie lithium. Comme la batterie lithium ion dure plus longtemps, son bilan écologique est nettement supérieur.
- Après une décharge complète, une batterie lithium ion peut se recharger entièrement en quelques heures.

La **figure 3.8** illustre la batterie choisie pour notre étude.



Figure 3.8 : Batterie Lithium ion Felicity Solar LPBG-48250 [85].

3.5.4 Choix du convertisseur :

Dans notre cas le convertisseur est choisi de type hors réseau (Off grid), il relie le bus CC et la charge CA et permet de convertir l'énergie produite par les générateurs Solaire-Eolien en CC (courant continu) de 48VDC en énergie utile fournie à la charge de 220 VAC (courant alternatif) pour une utilisation alternative industrielle. Le **tableau 3.4** ci-dessous présente les caractéristiques du convertisseur Felicitysolar IVPM10048 (**figure 3.8**) [86].

Tableau 3.4 : Caractéristiques du convertisseur Felicitysolar IVPM10048

Marque	Felicity Solar
Référence	IVPL10048
Tension d'entrée	48 VDC
Tension de sortie	220 VAC
Puissance de sortie	10000VA 8000 W
Rendement	98%
Poids	38.6 kg

Fréquence de sortie	50-60 Hz
Prix de l'unité	630€



Figure 3.9 : Convertisseur Feclity solar IVPM10048 [86].

3.6 Configuration du SEHR adoptée pour la SARL BOUBLENZA :

Les systèmes autonomes basés sur des sources d'énergie renouvelables produisent une énergie propre et contribuent à la protection de l'environnement et à l'élimination de la dépendance des ressources fossiles. D'autre part, selon certains arguments, ces systèmes induisent des coûts relativement élevés par rapport à la solution énergétique conventionnelle basée sur le diesel et le pétrole, ce qui en freine largement leur diffusion. Cependant, plusieurs auteurs et études soutiennent les systèmes autonomes basés sur l'énergie éolienne et photovoltaïque. Si ces systèmes sont correctement dimensionnés, peuvent définitivement concurrencer les sources conventionnelles. En plus de cela, l'exploitation combinée du potentiel éolien et solaire disponible d'une zone donnée peut réduire de manière significative les dimensions d'un système autonome (exigences de stockage d'énergie incluses) et donc diminuer davantage le coût de production d'énergie correspondant. L'idée de créer un système hybride combiné éolien-PV avec l'existence d'un dispositif de stockage d'énergie approprié [87], déjà largement reconnue est actuellement considérée.

Plus spécialement, pour faire face, aux besoins de la promotion de la transition énergétique en Algérie, le présent travail est consacré à l'étude technico-économique d'une installation autonome à base de SEHR implanté à la SARL BOUBLENZA, basée sur un générateur éolien, un générateur PV, un dispositif de stockage d'énergie (batteries), ainsi que les équipements électroniques correspondants. L'estimation des dimensions optimales d'un système éolien-PV autonome

typique sous la restriction d'un coût minimum à long terme est l'objectif principal de la présente analyse. Ceci devient plus intéressant quand il s'agit de faire face aux problèmes urgents d'électrification des consommateurs éloignés.

La **figure 3.10** ci-dessus, donne une vue d'ensemble du site de la SARL BOUBLEENZA qui se situe dans la région de Zenata Wilaya de Tlemcen (Algérie).



Figure 3.10 : Situation géographique de la SARL BOUBLEENZA

3.6.1 Présentation du site :

SARL BOUBLEENZA est une entreprise qui se situe à Tlemcen sur la latitude de $34,97^{\circ}$ N et $1,44^{\circ}$ W. C'est une entreprise pionnière dans la production de poudre de caroube. Depuis 1994; elle est spécialisée dans la transformation de caroubes en produits dérivés importants tels que la poudre de caroube, les graines de caroube et la pulpe de caroube.

Son siège principal se trouve sur la rue Bouabderrahmane, Faubourg Agadir à Tlemcen, 13000, Algérie. Elle emploie plus d'une centaine de travailleurs et vise les marchés internationaux pour sa production. Etant donné que le CARANI Caruma et BIOCAROB sont produits principalement afin d'être destinés à l'exportation. La SARL BOUBLEENZA accueille des offres de partenariat afin de renforcer sa présence en Europe, en Afrique et en Asie et le continent américain. Les membres de l'entreprise sont actifs dans différentes associations professionnelles et cadres telles que :

CCI Tafna, ACET, ANEXAL, CACI, FCE, CAGEX.

La **figure 3.11** illustre l'image satellitaire du site SARL BOUBLEENZA.

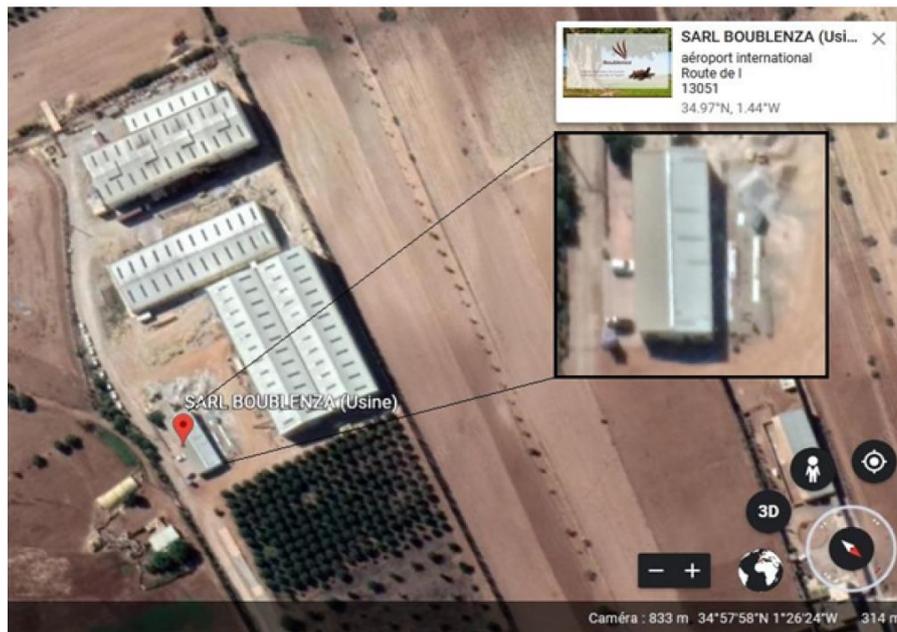


Figure 3.11 : Capture satellitaire de la SARL BOUBLENTZA

3.6.2 Architecture de la configuration proposée :

Dans une tentative de diversifier ses ressources en énergie et d'acquérir le label BIO pour ses produits internationaux, la SARL BOUBLENTZA s'engage d'exploiter le potentiel solaire et éolien important dans sa région. La configuration éolienne-PV-Système de stockage autonome suivante est proposée dont l'architecture est donnée dans la **figure 3.12** ; En particulier, le système éolien-PV autonome comprend un générateur éolien et un ensemble de modules PV connecté à un parc de batteries via un contrôleur de charge ou à un convertisseur DC/AC.

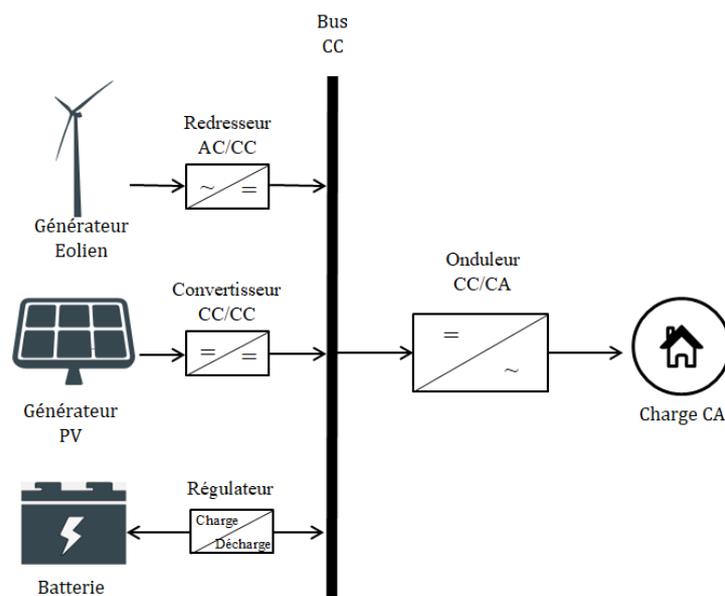


Figure 3.12 : Architecture du SEHR choisi

La capacité du système de stockage d'énergie (étant donné la maturité de la technologie, une batterie lithium ion s'avère être le choix le plus approprié doit être adéquate pour stocker la production d'énergie pendant les heures de vent et d'ensoleillement fort pour l'utiliser pendant la nuit ou quand les conditions météorologiques sont défavorables. Tandis que, la plupart des applications sont basées sur un courant alternatif, un onduleur est - comme déjà mentionné - également nécessaire.

3.6.3 Problématique et algorithme de dimensionnement :

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'objectif principal de l'analyse actuelle est d'estimer les dimensions appropriées d'un système PV-éolien autonome sous la contrainte du coût minimum. Dans ce contexte, les principales entrées du problème sont :

- Les mesures détaillées de la vitesse du vent "V" à la hauteur du moyeu pour une période donnée,
- Les mesures détaillées du rayonnement solaire "G" pour une période donnée généralement dans un plan horizontal,
- Les données de température ambiante pour toute la période analysée,
- Caractéristiques opérationnelles de la courbe de puissance de l'éolienne (dans des conditions normales de jour),
- Les caractéristiques opérationnelles de tous les autres dispositifs électroniques,
- Le profile horaire de consommation d'électricité de la charge,
- Les valeurs numériques de la puissance nominale de l'éolienne " P_{eo} ", de la puissance PV " P_{pv} ", et le nombre de panneaux " N_{pv} " et la taille maximale de la batterie " Q_{max} ".

Dans ce but, un algorithme de calcul est développé, afin de procéder à l'analyse paramétrique nécessaire sur une base horaire de la production et de la demande d'énergie.

Ainsi, pour chaque combinaison de " P_{eo} ", " N_{pv} " et " Q_{max} ", l'algorithme (voir **figure 3.13**) [88] est exécuté pour une période de temps spécifique (un mois dans notre cas) et pour un pas de temps d'une heure, tout en mettant l'accent sur l'obtention d'un fonctionnement sans rejet de charge. Si ce résultat n'est pas atteint, la taille de la batterie est augmentée et les calculs sont répétés jusqu'à ce que la condition de rejet sans charge soit satisfaite, c'est-à-dire :

$$Q^* = \min\{Q_{max}\} \quad \text{Eq (3.14)}$$

Ensuite, le nombre de panneaux PV est augmenté et le calcul est effectué depuis le début. Après l'intégration de l'analyse, une courbe $N_{pv} = f(Q^*)$ est prédite pour une puissance nominale donnée de l'éolienne " P_{eo} ", sous la restriction du rejet de la charge. Enfin, la puissance nominale

de l'éolienne est également augmentée, en répétant l'analyse complète. Pour obtenir une image claire, chaque combinaison de (P_{eo}, N_{pv}, Q^*) , le système éolien-PV est autonome en énergie pour la période étudiée. Enfin, la configuration optimale peut être sélectionnée parmi les distributions sans rejet de la charge (P_{eo}, N_{pv}, Q^*) , à condition d'appliquer un critère d'optimisation (Coût optimal). L'organigramme illustrant ces opérations est représenté dans la **figure 3.13** suivante :

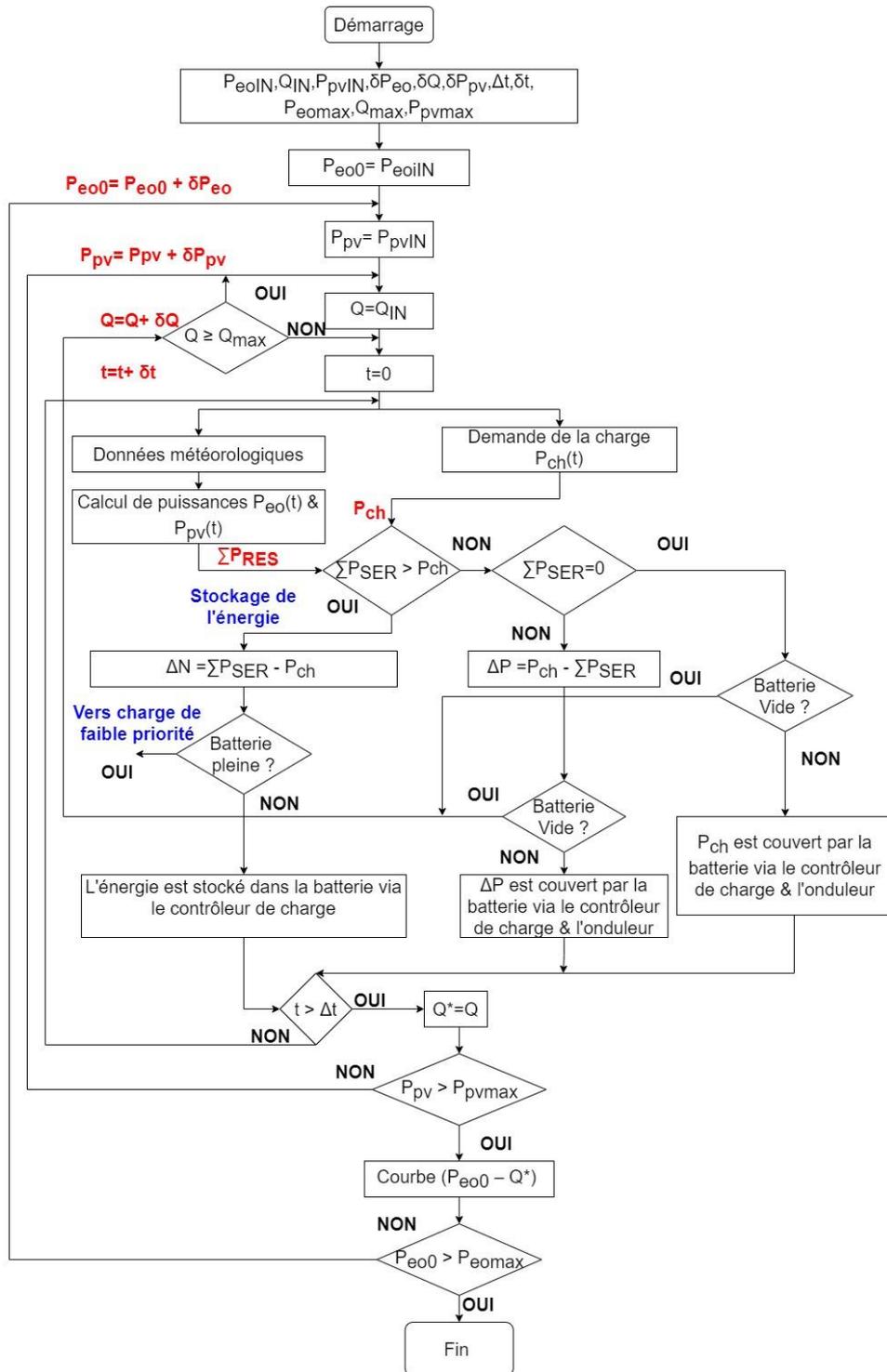


Figure 3.13 : Organigramme de dimensionnement du SEHR [88].

Par conséquent, pendant la longue période de service de l'installation (on suppose que vingt à trente ans sont une valeur réaliste), les modes de fonctionnement suivants peuvent apparaître :

- A. La production via l'onduleur des deux générateurs Eolien + PV est supérieur à la demande de la charge est exprimée comme suit :

$$\left(P_{pv}(t) + P_{eo}(t) \right) \geq \frac{P_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \quad \text{Eq (3.15)}$$

Dans ce cas le surplus est stocké via le régulateur de charge de rendement η_{cc} au niveau du banc de batteries :

$$\Delta P(t) = \eta_{cc} \times \left(P_{pv}(t) + P_{eo}(t) - \frac{P_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \right) \quad \text{Eq (3.16)}$$

Si la batterie est pleine $Q^* = Q_{max}$ L'énergie résiduelle " E_{res} " est transmise aux charges à faible priorité.

- B. La puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance de sortie des deux générateurs renouvelables, c'est-à-dire que :

$$P_{ch}(t) \geq \eta_{inv} \times \left(P_{pv}(t) + P_{eo}(t) \right) \quad \text{Eq (3.17)}$$

Donc le déficit de puissance $\Delta P'(t)$ est exprimé comme suit :

$$\Delta P'(t) = P_{ch} - \eta_{inv} \times \left(P_{pv}(t) + P_{eo}(t) \right) \quad \text{Eq (3.18)}$$

Ce déficit est couvert par l'énergie disponible stockée dans la batterie de capacité " Q_0 " en supposant que les contraintes soient respectées :

$$DOD(t) \leq DOD_L \quad \text{Eq (3.19)}$$

$$Q_0 \geq Q_{min} \quad \text{Eq (3.20)}$$

Notez que dans ce cas (B), lorsque la capacité de la batterie est proche de la limite inférieure, un plan de gestion de la demande d'électricité doit être appliqué comme l'introduction d'un générateur diesel pour protéger le banc de batterie, sinon les charges de faibles priorités seront déconnectées (délaistage).

Notons que la SARL BOUBLENZA dispose déjà d'un générateur diesel, nous nous sommes contentés de proposer uniquement un système énergétique hybride basé sur des générateurs renouvelables.

En résumé, les principaux paramètres qui définissent la taille et, par la suite, le premier apport de l'installation et le coût d'investissement à long terme de notre SEHR comprennent :

- La puissance nominale de l'éolienne " P_{eo} ",
- Le nombre de modules PV " N_{pv} " et leur puissance de crête " P_{pv} ",
- La capacité maximale des batteries " Q_{max} " choisie pour garantir l'autonomie énergétique du système pendant la période souhaitée.
- Finalement la puissance du reste des équipements électroniques nécessaire, c'est-à-dire l'onduleur et le contrôleur de charge (en fonction de la demande de charge de pointe) ainsi que le régulateur (en fonction de la puissance nominale du générateur éolien et PV).

3.7 Intérêt économique :

L'algorithme à développer a pour objectif de minimiser la capacité de stockage qui influe sur le coût global d'investissement à long terme, il devient donc plus que nécessaire de minimiser ce dernier d'où l'étude du critère économique présentée dans ce qui suit :

L'étude économique abordera plusieurs paramètres entres autres :

- Le coût d'achat du système,
- Le coût de maintenance,
- Le coût de renouvellement,
- Et finalement le coût total.

3.7.1 Coût d'achat :

C'est la somme totale des coûts d'achats de chaque composant [84] [89] défini par :

$$Ca = N_{pv} \cdot C_{pv} + N_{eo} \cdot C_{eo} + N_{bat} \cdot C_{bat} + N_{con} \cdot C_{con} \quad \text{Eq (3.21)}$$

Avec

- C_{pv} : Le coût d'achat d'un panneau photovoltaïque,
- C_{eo} : Le coût d'achat d'une éolienne,
- C_{bat} : Le coût d'achat d'une batterie,
- C_{con} : Le coût d'achat d'un convertisseur,

- N_{pv} : Le nombre des panneaux photovoltaïques,
- N_{eo} : Le nombre d'éoliennes,
- N_{bat} : Le nombre des batteries,
- N_{con} : Le nombre des convertisseurs.

3.7.2 Coût de maintenance :

Il est défini comme suit :

$$Cm = T \cdot N_{pv} \cdot M_{pv} + T \cdot N_{eo} \cdot M_{eo} + (T - K_{bat} - 1) \cdot N_{bat} \cdot M_{bat} + (T - K_{con} - 1) \cdot N_{con} \cdot M_{con} \quad \text{Eq (3.22)}$$

- M_{pv} : Le coût de maintenance d'un panneau photovoltaïque,
- M_{eo} : Le coût de maintenance d'une éolienne,
- M_{bat} : Le coût de maintenance d'une batterie,
- M_{con} : Le coût de maintenance d'un convertisseur,
- K_{bat} : Le nombre de renouvellement d'une batterie durant T,
- K_{con} : Le nombre de renouvellement d'un convertisseur durant T,
- T : La durée de vie en années (ans).

3.7.3 Coût de renouvellement :

Défini comme suit :

$$Cr = C_{pv} \cdot N_{pv} \cdot K_{pv} + C_{eo} \cdot N_{eo} \cdot K_{eo} + C_{bat} \cdot N_{bat} \cdot K_{bat} + C_{con} \cdot N_{con} \cdot K_{con} \quad \text{Eq (3.23)}$$

- K_{pv} : Le nombre de renouvellement d'un panneau PV durant T
- K_{eo} : Le nombre de renouvellement d'une éolienne durant T

Puisque les générateurs PV et éolien ne subissent aucun renouvellement durant toute la durée de vie de notre SEHR $K_{pv} = K_{eo} = 0$

L'équation (3.23) devient :

$$Cr = C_{bat} \cdot N_{bat} \cdot K_{bat} + C_{con} \cdot N_{con} \cdot K_{con} \quad \text{Eq (3.24)}$$

3.7.4 Le coût total :

Le coût global pendant toute la durée de fonctionnement du SEHR est donné par :

$$C_t = C_a + C_m + C_r \quad \text{Eq (3.25)}$$

Ce coût nous permettra d'avoir une estimation plus concrète par rapport à notre SEHR, nous le prendront en considération dans notre algorithme d'optimisation et ce sera un paramètre clé pour dimensionner de manière optimale avec la contrainte d'un coût minimal de notre SEHR.

3.8 Conclusion :

Ce chapitre donne une vue d'ensemble des techniques d'optimisation pour les problèmes d'optimisation, de modélisation et de dimensionnement pour les systèmes énergétiques hybrides.

Nous avons ensuite décrit brièvement les formules mathématiques nécessaires à la modélisation de tous les composants de notre SEHR. Les formules mathématiques étant établies ; l'étape suivante dans la modélisation est le choix du matériel utilisé, c'est-à-dire celui de tous les générateurs et convertisseurs ainsi que le dispositif de stockage adéquat.

Finalement, nous nous sommes étalés sur l'algorithme de dimensionnement régissant notre système. Un aperçu de l'étude économique a également été établi afin de donner plus de visibilité à notre travail.

Ces considérations seront mises en application dans les études développées dans le CHAPITRE 04.

CHAPITRE 04 :

Résultats de

simulation et

discussion

4.1 Introduction :

Le dimensionnement des différents dispositifs d'un système hybride de production d'énergie est critique et nécessite une étude approfondie des données météorologiques changeant toutes les heures, afin d'avoir une configuration rentable du système hybride avec une fiabilité maximale. Le profil de la demande de la charge électrique, la conception, la planification et l'optimisation, sont les étapes nécessaires pour le dimensionnement du système hybride.

Les données d'entrée du projet sont le profil de la charge, les mesures horaires du rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent durant 16 jours. La demande de charge durant la nuit est également prise en compte. Afin de valider les performances de la méthode adoptée. L'algorithme proposé est programmé sur la plateforme MATLAB. Ensuite, une analyse et une synthèse des résultats obtenus seront évoqués. Différentes configurations et différentes approches seront abordées afin de cibler la configuration optimale recherchée.

Au début du chapitre nous donnons un aperçu général sur les outils de mesure utilisés pendant la période de mesure au sein de la SARL. En suite sont présentés les données climatiques sur lesquelles notre programme sera exécuté. A la fin de ce chapitre démontre l'efficacité de la méthodologie proposée par le biais d'une discussion de la configuration obtenue du système hybride PV-éolien.

4.2 Potentiel Eolien :

Avant l'implantation d'un parc éolien, il est nécessaire d'en évaluer le potentiel de production afin de déterminer s'il est rentable d'investir dans l'exploitation du « gisement ». Des mesures de vent doivent être effectuées sur le site identifié pour le futur parc éolien.

La méthode la plus adéquate est de placer des anémomètres avec des girouettes élevés à différentes hauteurs et installés pendant au moins un an pour évaluer la direction et la vitesse moyenne du vent qui change selon les saisons, la **figure 4.1** suivante nous donne un aperçu de cet appareil [90] :



Figure 4.1 : Anémomètre avec girouette [90].

Ces mesures permettent également de déterminer les types d'éoliennes à installer et leur emplacement exact afin que leur rotation soit parallèle à la direction du vent.

Dans notre cas, les mesures de la vitesse du vent sont obtenues grâce à la plateforme en ligne « Global Wind ATLAS » pour chaque heure à une hauteur de 10m du sol.

- Les mesures détaillées de la vitesse du vent "V" pour une période donnée (par exemple, un mois dans notre cas) sont présentées dans le **tableau 4.1** suivant

Tableau 4.1 : Mesures des vitesses du vent (m/s)

Vitesses du vent (m/s)																
J h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	2,34	4,31	1,72	2,58	2,36	2,4	2,28	2,26	3,17	3,14	2,2	3,42	2,11	6,83	1,56	3,08
1	3,74	4,18	1,86	2,53	2	2,6	2,33	2,24	3,61	3,72	1,8	2,58	3,14	7,06	2,58	3,22
2	2,43	3,82	2,03	2,72	2,19	2,8	2,25	2,31	2,14	2,22	4,8	2,11	4,06	7,19	1,64	3,11
3	2,32	2,69	1,44	1,97	2,36	3,1	2,72	2,3	3,19	2,33	4,3	1,47	5,86	5,14	2,69	2,58
4	2,4	2,79	2,17	1,81	1,97	3,8	2,69	2,4	3,85	2,03	3,1	2,17	7,44	4,56	3,61	2,06
5	2,64	3,27	1,69	3,06	1,81	1,3	2,28	2,54	2,91	1,03	4,1	3,14	6,67	3,08	2,06	1,56
6	3,71	3,33	1,03	3,42	1,69	1,4	2,47	2,34	2,94	0,39	3,4	3,94	10,1	5,17	2,11	1,06
7	2,15	3,11	2,72	4,14	1,72	1,9	2,67	2,73	2,39	0,81	5,1	2,64	9,36	3,25	1,61	1,28
8	3,31	3,06	3,06	0,94	1,78	2,2	1,97	3,7	2,75	1,22	5,8	2,31	7,89	6,17	2,06	1,03
9	3,57	3,19	3,94	3,78	2,31	2,4	1,81	3,4	2,14	1,86	5,9	1,47	8,14	7,19	2,58	1,17
10	3,71	2,55	2,56	4,28	3,11	4,2	2,19	3,17	2,69	2,61	7,6	2,28	11,4	6,17	2,69	1,61
11	3,14	1,92	2,11	5,08	4,14	3,9	2,31	4,69	2,33	3,08	6,9	3,31	9,81	5,67	3,97	1,53
12	3,92	1,28	2,14	4,83	4	3,1	2,92	4,36	2,18	4,11	5,6	3,08	9,25	5,78	4,39	1,56
13	4,21	1,09	4,5	4,67	3,94	3,6	2,97	5,83	3,26	4,64	6,2	4,11	9,5	8,22	5,36	2,06
14	3,69	1,79	4	5,36	3,83	3,6	3,14	5,42	2,94	4,75	6,6	3,67	7,72	8,75	4,22	3,08
15	2,93	1,41	4,69	3,11	3,81	3,5	3,31	2,63	4,12	5,14	7,2	4,14	8,22	6,69	4,78	4,11
16	2,87	1,88	4,19	2,61	3,83	3,6	3	3,71	3,17	5,67	7,2	3,61	8,25	6,83	5,14	4,06
17	3,67	2,03	3,42	2,58	2,67	3,1	3,42	4,08	3,12	3,61	6,2	4	7,19	7,19	5,44	3,94
18	2,89	2,63	2,19	2,44	2,33	2,9	4,78	5,24	5,73	2,58	6,2	3,72	6,17	4,11	4,78	3,19
19	3,71	3,14	2,31	2,06	2,03	3	3,11	5,29	2,24	2,22	4,1	2,58	5,14	1,03	4,22	2,08
20	3,12	2,55	1,03	1,69	2,25	2,4	2,61	4,78	3,69	2,06	5,1	1,03	3,08	1,03	1,28	1,08
21	3,66	2,47	0,58	0,81	1,36	1,2	2,28	4,38	3,58	2,06	4,1	2,06	3,67	2,06	2,28	0,78
22	5,43	2,71	1,33	0,75	2,42	1,6	1,86	4,17	3,75	1,03	4,1	1,56	3,25	3,08	2,61	0,94
23	3,34	2,96	1,25	1,5	1,92	2,4	1,42	3,43	2,39	2,22	2,1	1,03	3,36	1,56	1,81	1,08

Il est clair que la majorité des vitesses du vent mesurées sont inférieures à la vitesse moyenne qui vaut $V_{moy}=3,34$ m/s, les valeurs des cellules colorées en vert représentent des vitesses de vent assez importantes qui peuvent contribuer au bon fonctionnement de notre générateur éolien car elles sont bien au-dessus de sa vitesse de démarrage, les valeurs des cellules non colorées dominent le reste du tableau et représentent des vitesses de vent relativement faibles, ajouté à cela, les valeurs des cellules colorées en beiges qui représentent des vitesses du vent très faibles qui ne dépassent pas les 2 m/s (largement inférieur à la vitesse moyenne). Aucune des vitesses du vent mesurées n'atteignent la vitesse nominale de l'éolienne qui est estimée à 13m/s, et donc l'éolienne ne fournira en aucun cas une puissance nominale.

La courbe de variation de ces données est illustrée dans la (**figure 4.2**) suivante afin de mieux les interpréter :

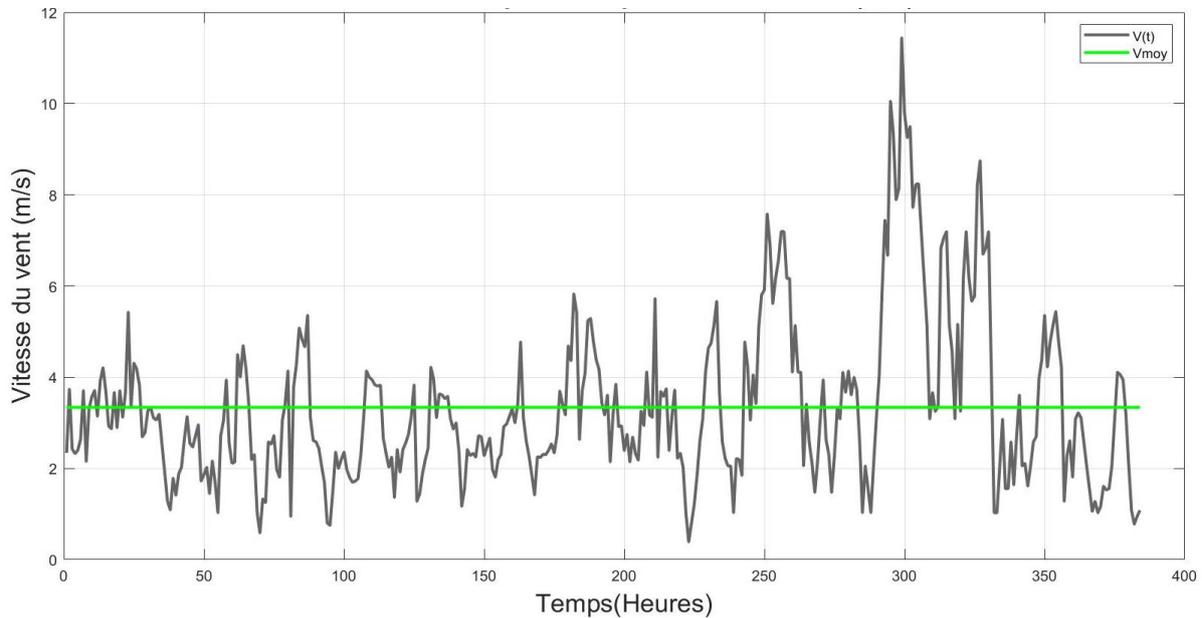


Figure 4.2 : Profil de la vitesse du vent

A travers la figure nous pouvons constater que la vitesse du vent est imprévisible et stochastique. Rajouté à cela, le faible potentiel éolien que nous avons rencontré lors de notre étude. Une droite reportée sur la figure (en vert) représente la valeur moyenne de la vitesse du vent, et qui vaut $V_{vmoy}=3,34\text{m/s}$. Nous pouvons remarquer que la majorité des vitesses mesurées pour chaque heure sont en dessous de la droite et donc au-dessous de la moyenne.

4.3 Potentiel solaire :

Le potentiel d'énergie solaire peut être défini comme le rayonnement solaire physiquement disponible à la surface de la terre, il peut être mesuré par divers méthodes dont :

- Les mesures de rayonnement prélevées pratiquement sur le site d'étude,
- Les observations des stations météorologiques,
- L'imagerie satellitaire.

La quantité d'électricité produite par un panneau solaire dépend de la quantité d'énergie solaire qu'il reçoit. Deux paramètres déterminent la quantité d'énergie reçue par un panneau : l'orientation, que l'on mesure à l'aide de l'azimut, et l'inclinaison. Ce sont deux angles que l'on exprime en degrés. Pour l'étude que nous avons menée, un pyromètre (**figure 4.3**) a été disposé sur un support incliné à 30° orienté sud dans quatre points différents du bloc.



Figure 4.3 : Pyromètre incliné à 30° SUD [90].

- Les mesures détaillées du rayonnement solaire "G" pour une période donnée (par exemple, un mois dans notre cas), sont présentées dans le (tableau 4.2) suivant :

Tableau 4.2 : Mesures de l'éclairement solaire (W/m²)

Eclairement (W/m ²)																
J h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	103	42,3	42,3	0	46,8	17	0	6,5	31,5	31,5	114	37,8	42,8	98,5	128	130
8	257	138	122	30,5	137	114	136	12,8	166	155	264	266	72	211	221	259
9	341	398	283	274	324	250	274	12,8	345	318	318	475	136	468	401	403
10	538	545	552	531	541	547	571	25,3	597	669	569	615	149	677	587	562
11	727	712	695	662	699	759	756	277	779	768	768	765	238	764	808	759
12	830	860	827	621	784	831	847	755	840	893	831	845	148	840	905	853
13	851	940	898	867	889	872	894	493	889	890	893	890	324	908	923	875
14	889	890	882	822	871	824	825	527	921	910	893	917	495	874	871	837
15	793	811	825	711	785	719	720	637	836	849	856	882	564	800	813	742
16	643	658	693	643	659	637	662	717	791	749	715	801	255	699	709	651
17	537	546	542	526	538	605	560	497	647	629	615	719	466	552	556	446
18	319	259	288	230	274	325	340	319	346	454	433	491	439	364	378	367
19	84,8	100	122	142	112	141	149	29	119	212	229	242	227	200	228	251
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	0	51	46,5	37,3
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Il est clair que l'éclairement global mesuré du site est très important avec des journées qui commencent avec un ensoleillement conséquent dès 7h du matin, et qui atteint par la suite des pics à 13h pour ensuite rechuter voire s'annuler en fin de journée à partir de 19h

Afin de mieux interpréter ces résultats, nous les illustrons dans la courbe de la (figure 4.4) suivante :

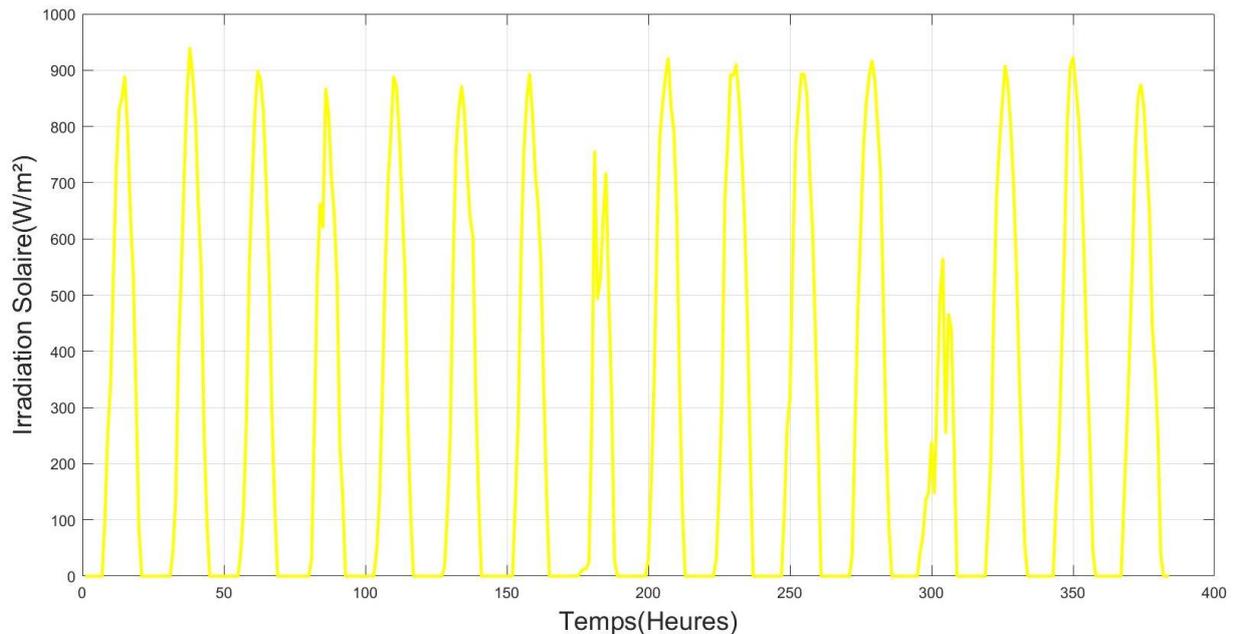


Figure 4.4 : Profil du rayonnement solaire

Nous pouvons constater à travers cette figure le fort potentiel solaire du site même au mois de février (un mois défavorable) qui atteint des pics allant jusqu'à 900W/m^2 , cependant, nous pouvons également remarquer de légères fluctuations qui représentent le passage des nuages ceci affecte indirectement la puissance délivrée par notre générateur PV et rend notre étude plus réaliste.

Par ailleurs, La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule photovoltaïque et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant). Pour cela Les mesures détaillées de la température ambiante " T " pour une période donnée (par exemple, un mois dans notre cas), sont représentées dans la figure suivante :

Nous pouvons remarquer à travers la **figure 4.5** que la température ambiante au mois de Février est modérée avec des minimums atteignant les 7°C la nuit et des pics s'élevant à 24°C durant les journées les plus chaudes, ce qui est prospère au bon fonctionnement des panneaux PV.

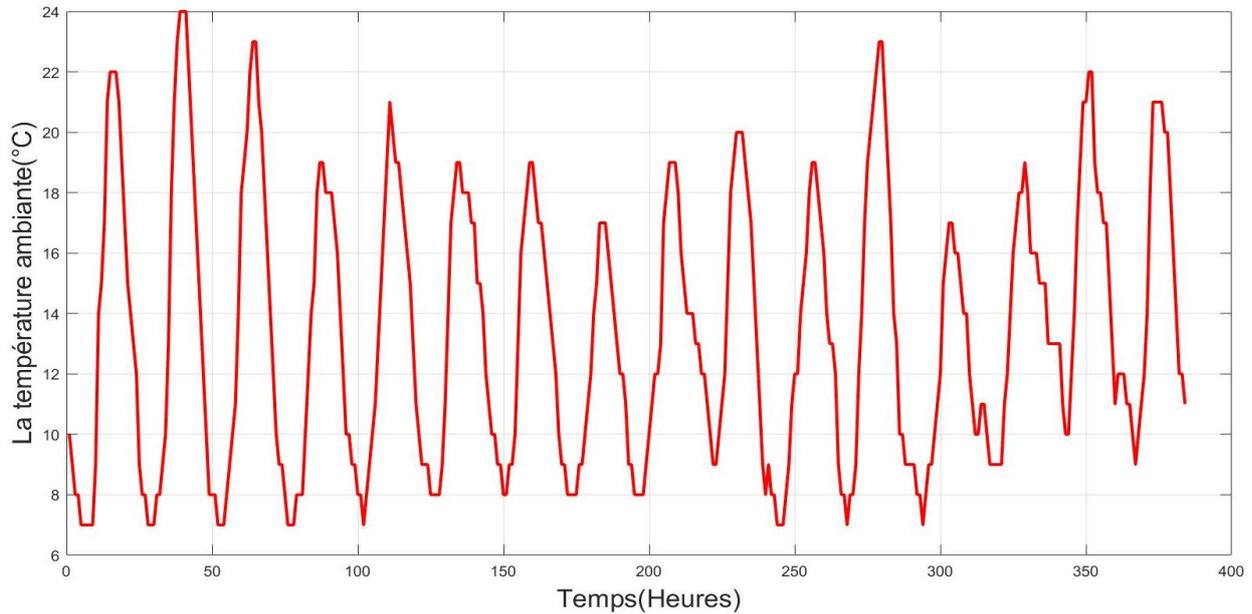


Figure 4.5 : Profil de la température

4.4 Profil de la charge :

Le profil de la charge est consacré principalement à la consommation du bloc administratif. Les mesures détaillées présentées dans le **tableau 4.3** ci-dessous montrent la consommation de chaque heure pour toute la durée d'étude.

Tableau 4.3 : Mesures de la charge (kW)

Consommation (kW)																
J h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
1	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
2	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
3	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
4	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
5	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
6	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
7	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
8	8,9	8,7	5,7	7	8,5	7,3	7,2	7,1	4,5	7,8	4,4	4,6	5,7	4,2	4,68	3,6
9	9,4	8,2	6	7,5	9,4	8,1	7,9	7,6	7,2	7,6	4,5	4,3	8,9	6,7	5,9	4,2
10	9	9,3	7,6	7,6	8,8	8,8	7,2	9,3	9	9,4	5,9	7	9,2	4,3	6	4,5
11	9,1	9,3	7,3	6,3	8,4	9,1	7,5	9,1	8,8	8,7	6,5	6,1	7,9	6,5	4,2	5,1

12	9,2	8,3	6,6	4,2	3,2	7,6	7,1	9,5	4,5	3,4	7,3	4,2	7,1	3,6	3,7	3,4
13	9,2	6	3	4	4,3	4,9	4,5	7,5	5,7	4	3,2	6,7	5,2	3,2	3,5	3
14	6,3	3,1	6,8	7,4	6,8	6,3	6,1	5,5	3,3	5,8	5,8	4,2	6,8	5,3	5,8	2,3
15	9	8,6	4	4,3	5	6,1	6,3	7,4	7,6	3	2,8	4,5	6,2	6,8	7,1	3,8
16	7,6	6,4	5,5	4,5	4,2	5,5	5,7	7,2	5,8	3,9	4,8	3,9	5,4	4,1	6,7	3,1
17	4,2	4,2	3,5	3,9	3,5	3,7	3,2	5,7	5,1	3,7	2,9	4,2	4,2	4,6	5,2	3,51
18	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
19	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
20	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
21	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
22	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51
23	3,25	5,95	5,21	3,48	4,92	4,9	5,29	5,7	4,7	4,85	2,9	3,41	4,73	4,17	4,68	3,51

Les mesures reportées sur le tableau, montrent une consommation très importante pour les journées à forte charge, aussi bien de jour comme de nuit. Ceci démontre le profil industriel de la SARL BOUBLENZ. Afin de mieux illustrer ces données, elles sont représentées dans la **figure 4.6** :

Ainsi ; on remarque une activité importante durant les heures de travail à partir de 09h00 du matin, qui atteint des pics de consommation d'une valeur de 9,5 kWh.

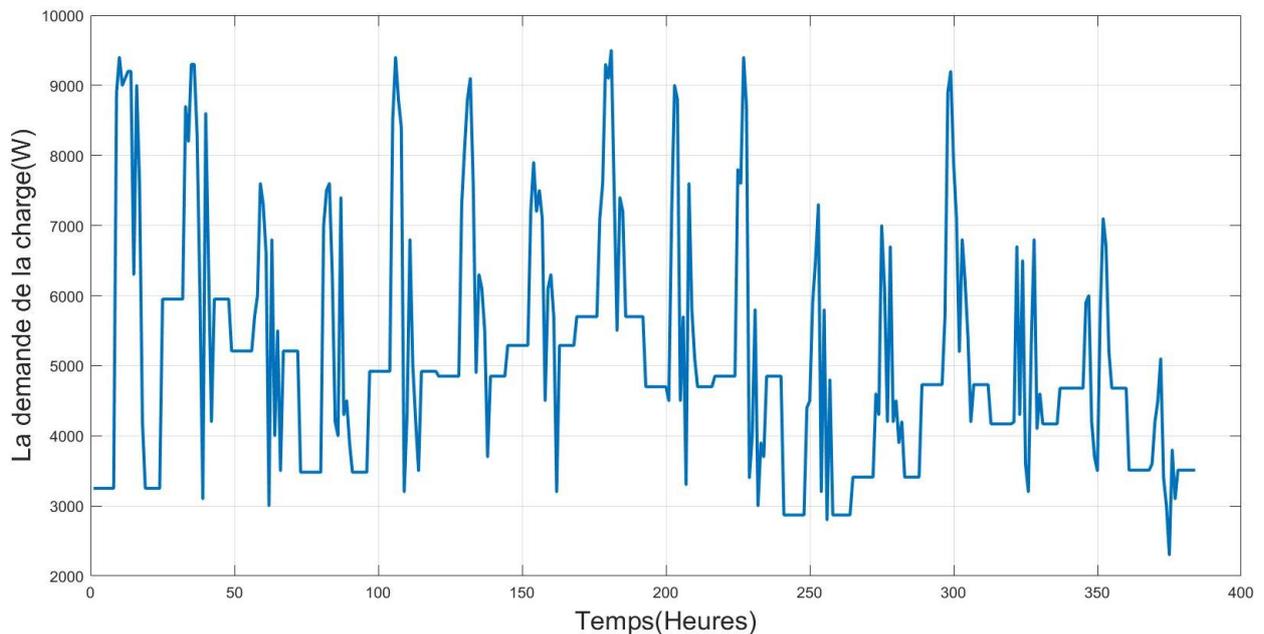


Figure 4.6 : Profil de la demande de la charge

4.5 Résultat obtenus et discussion :

La mise en application de notre algorithme a permis de recenser plusieurs configurations dans le dimensionnement du SEH. Notre but est de choisir la meilleure solution au problème afin d'avoir une perspective durable ; vaste et riche en informations.

Notre approche consistera à dimensionner notre système de manière à subvenir aux besoins de la charge pour chaque heure, en tenant compte du profil de consommation qui varie d'heure en heure et en prenant en compte tous les pics de charge. Ceci en sachant que notre étude a été portée sur le mois de février qui est peu favorable (présence de nuages voir **figure 4.4**) ce qui influe négativement sur le rendement du générateur PV, mais également les mesures satellitaires de la vitesse du vent qui diverge de la réalité.

Après avoir modélisé et introduit le SEH et ses contraintes sur la plateforme MATLAB, nous avons élaboré un programme utilisant l'algorithme décrit précédemment.

4.5.1 Configurations choisies :

4.5.1.1 Configuration « Eolienne-batterie seulement » :

L'algorithme développé nous a permis d'obtenir les résultats de la **figure 4.7** Pour une configuration hybride Eolien + Batterie. La figure représente la capacité de stockage des batteries nécessaire pour satisfaire la charge en fonction de la variation de la puissance délivrée par l'éolienne uniquement.

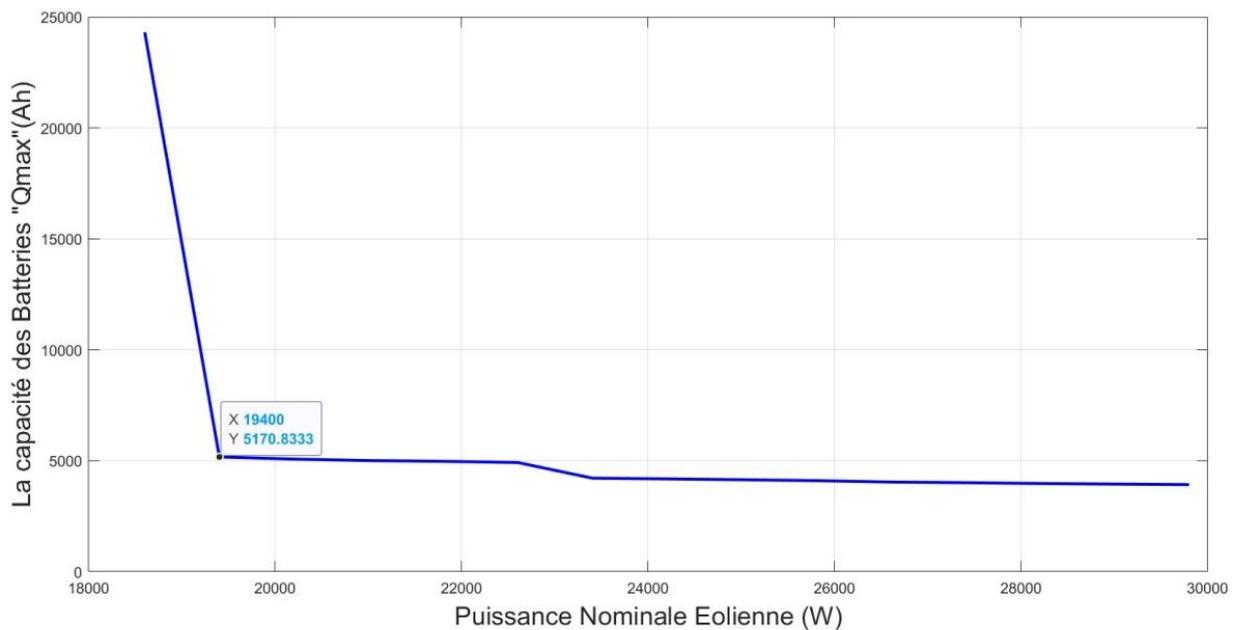


Figure 4.7 : Variation de la capacité du stockage en fonction de la puissance éolienne à installer

Nous pouvons remarquer à travers la figure ci-dessus, que la capacité de stockage dont a besoin notre SEH est extrêmement élevée, pour de faibles puissances délivrées par le générateur éolien. Tandis qu'avant une certaine puissance éolienne (18000W) cette capacité chute drastiquement, pour se stabiliser approximativement à une valeur de (± 5000 Ah).

L'inconvénient majeur de cette configuration se situe dans l'énorme besoin en puissance éolienne, et par ailleurs l'énorme dimensionnement du parc éolien (+ de 22 éoliennes dans ce cas) ce qui influe d'une part sur la fiabilité du système (faible potentiel éolien traduit par la **figure 4.2**) et d'autre part sur le coût globale de l'installation.

Donc, il ne serait pas intéressant d'investir dans une configuration pareille, d'où la nécessité d'analyser d'autres configurations hybrides, comprenant les autres composants du SEH.

4.5.1.2 Configuration « Eolienne - PV - Batteries » :

Pour cette seconde configuration, nous avons opté pour un SEH avec deux sources renouvelables distinctes, l'objectif primaire de cette hybridation est de pouvoir réduire de manière significative la capacité de stockage, et par ailleurs le coût d'investissement à long terme.

D'autre part, nous cherchons à exploiter le fort potentiel solaire dont dispose notre site (**Figure 4.4**) et ce malgré les conditions peu favorables du mois de février. Il s'agit de retracer la courbe de la **figure 4.7** pour différentes puissances de panneaux PV à savoir 17 PV, 27PV, 33PV :

La **figure 4.8** illustre les courbes de variation pour différentes puissances PV. La capacité de stockage en fonction de la puissance nominale éolienne pour différents combinaisons PV

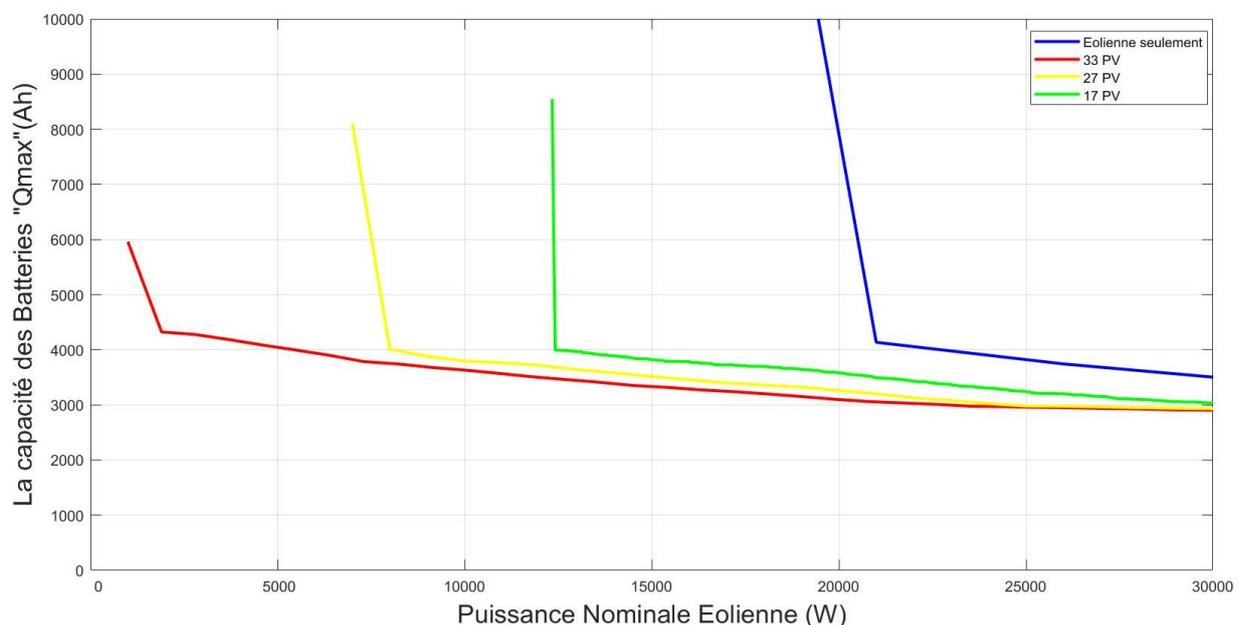


Figure 4.8 : Variation de la capacité de stockage en fonction de la puissance éolienne avec différentes combinaisons PV

Nous constatons à travers cette figure que l'implémentation des générateurs PV influe considérablement sur la puissance nominale éolienne nécessaire, et par ailleurs sur la capacité de stockage. Plus l'on ajoute de PV, plus la puissance éolienne baisse. Le stockage compte à lui se stabilise pour les différentes combinaisons, pour une capacité d'environ ± 4000 Ah. Ceci prouve

que notre configuration dépend essentiellement de la puissance PV, et donc à forte dominance des panneaux PV.

L'ajout de générateurs photovoltaïques contribuera non seulement à la réduction de la puissance éolienne nécessaire, mais également à la fiabilité du SEH, et par ailleurs à la réduction du coût global de l'installation. Ceci est dû au prix très compétitif des panneaux PV et le potentiel énorme du site.

4.5.1.3 Configuration « Eolienne - PV - Batteries » optimale 1 :

Pour la configuration optimale choisie, la capacité du parc de stockage est représentée dans la **figure 4.9** en fonction de la puissance nominale éolienne nécessaire, le point optimal y est également mentionné. Il représente une configuration comprenant 33 PV /1800W éolien équivalent à 2 éoliennes de type SUN 800 et une capacité de stockage de 4333,333Ah correspondant à environ 17 batteries.

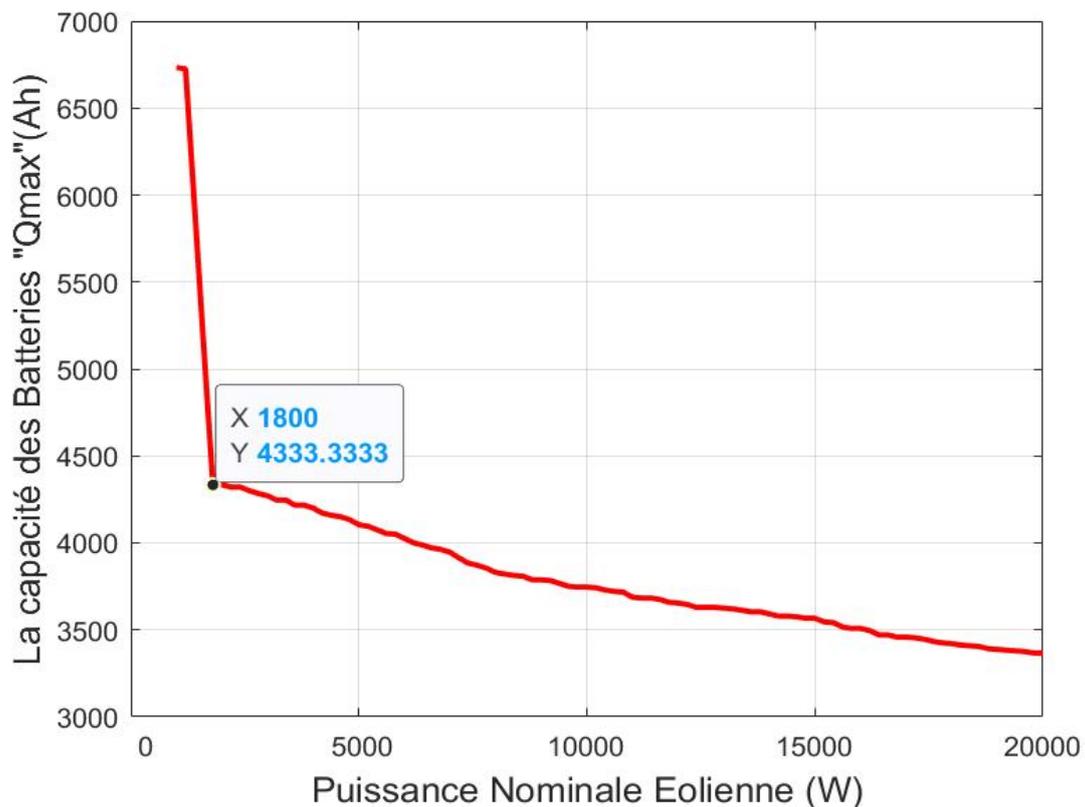


Figure 4.9 : Variation de la capacité du stockage en fonction de la puissance éolienne avec 33 PV cas de configuration optimale 1

Pour cette configuration, l'optimum a été atteint grâce à un ajout considérable de PV ce qui a réduit de manière significative la puissance éolienne nominale nécessaire. L'on pourrait croire qu'en augmentant la puissance éolienne, la capacité de stockage chuterai proportionnellement à cette dernière, mais ceci est faux, car au-delà de l'optimum, la chute de la capacité de stockage devient trop peu significative, et donc l'ajout d'éoliennes ne fera que sur-dimensionner notre SEH et par ailleurs rendre le coût total du SEH élevé.

Afin de donner plus de visibilité à notre étude, nous projetons ces résultats techniques, sur une approche économique. La **figure 4.10** représente l'influence de la puissance éolienne sur le coût du SEH :

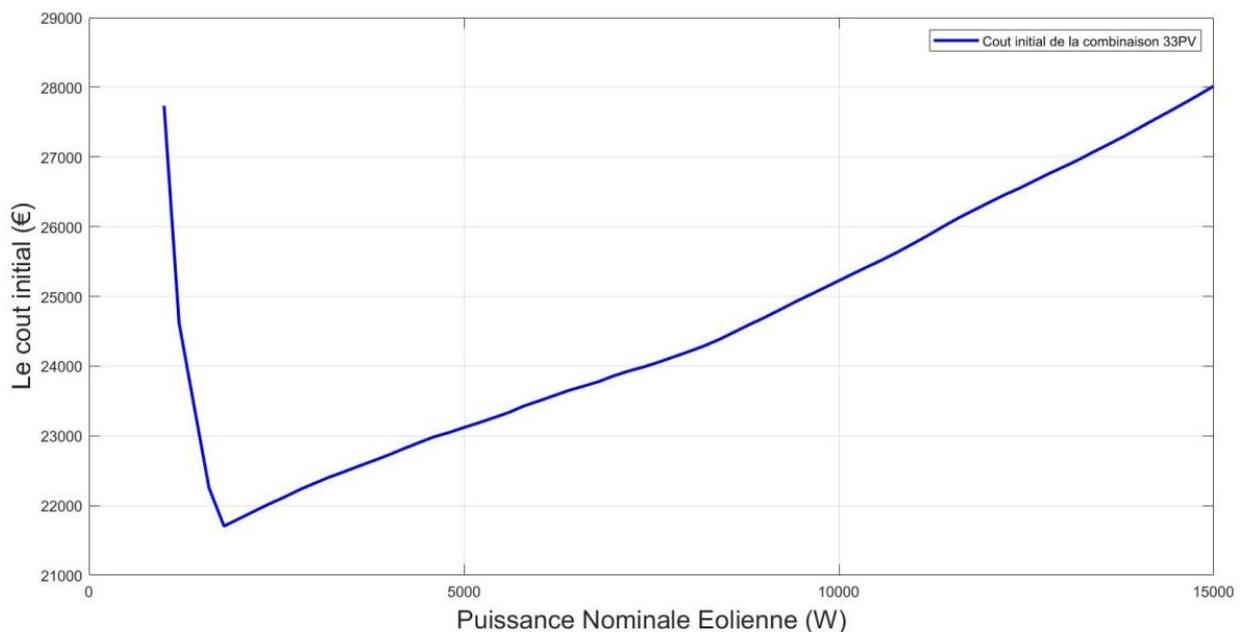


Figure 4.10 : Influence de la puissance éolienne sur le coût du SEH

Il est clair que l'augmentation de la puissance éolienne influera négativement sur le coût du SEH, en cas de surdimensionnement de la puissance éolienne et ce une fois le seuil optimal dépassé 1800W (2 éoliennes).

L'ajout de PV serait intéressant à long terme, du fait de son faible coût sur toute la durée de vie du SEH (25ans à peu près), l'idée nous ait donc venue de proposer une 4^{ème} et dernière configuration, en augmentant le nombre de PV tout en respectant le nombre de PV maximal imposé par le cahier de charge.

4.5.1.4 Configuration « Eolienne - PV – Batterie » optimale 2 :

Dans cette configuration le nombre d'éoliennes a été fixé à 2, et nous avons cherché à trouver l'impact qu'aurait l'ajout de puissance PV sur la capacité de stockage.

La **figure 4.11** suivante reflète la capacité de stockage des batteries en fonction de la puissance nominale PV

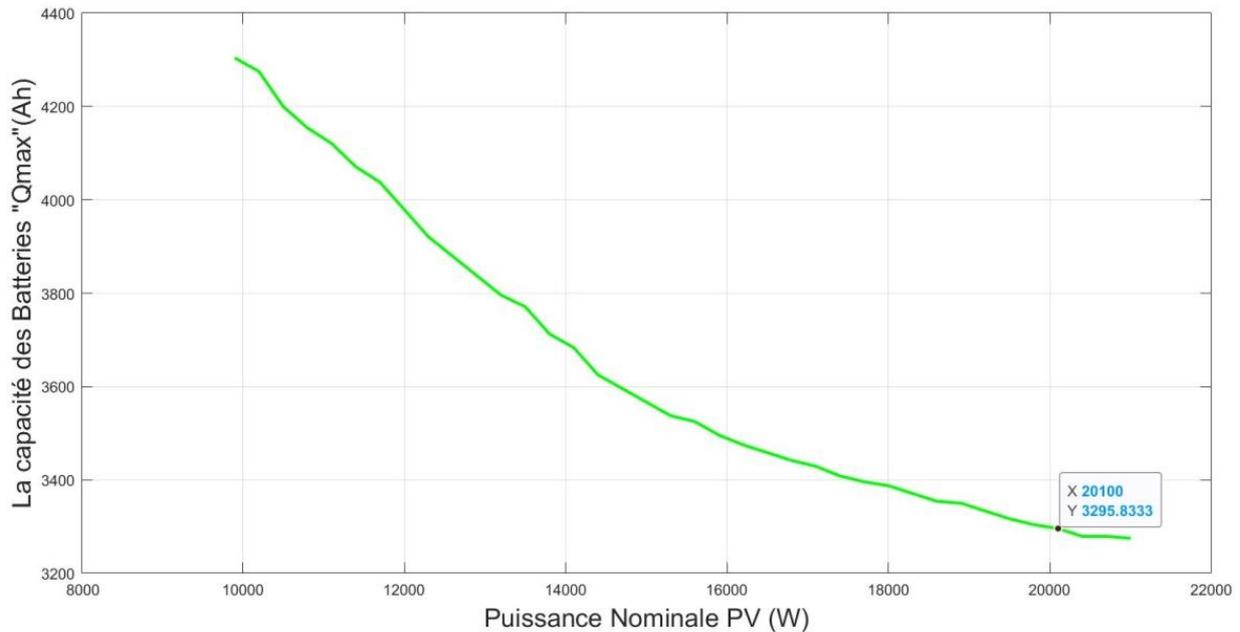


Figure 4.11 : Capacité de stockage en fonction de la puissance PV

Nous pouvons facilement remarquer que la chute de la capacité de stockage devient beaucoup plus significative lors de l'ajout de puissance PV et donc de générateurs PV. Cette chute devient peu importante à partir d'une valeur 3295,53 Ah, approximativement 13 batteries. Au-delà de cette valeur, nous risquons d'affecter négativement l'autonomie du système.

Cette configuration est optimale non seulement d'un point de vue coût à long terme, mais également vis-à-vis de la préservation des performances des batteries (réduction des cycles de charge et décharge) ce qui prolonge leur durée de vie et donc réduit leur coût de remplacement à long terme.

A titre d'exemple, l'état de charge et de décharge du parc des batteries pour les deux configurations optimale 1 et optimale 2, durant toute la période de notre étude (1 mois) est représenté dans la **figure 4.12** :

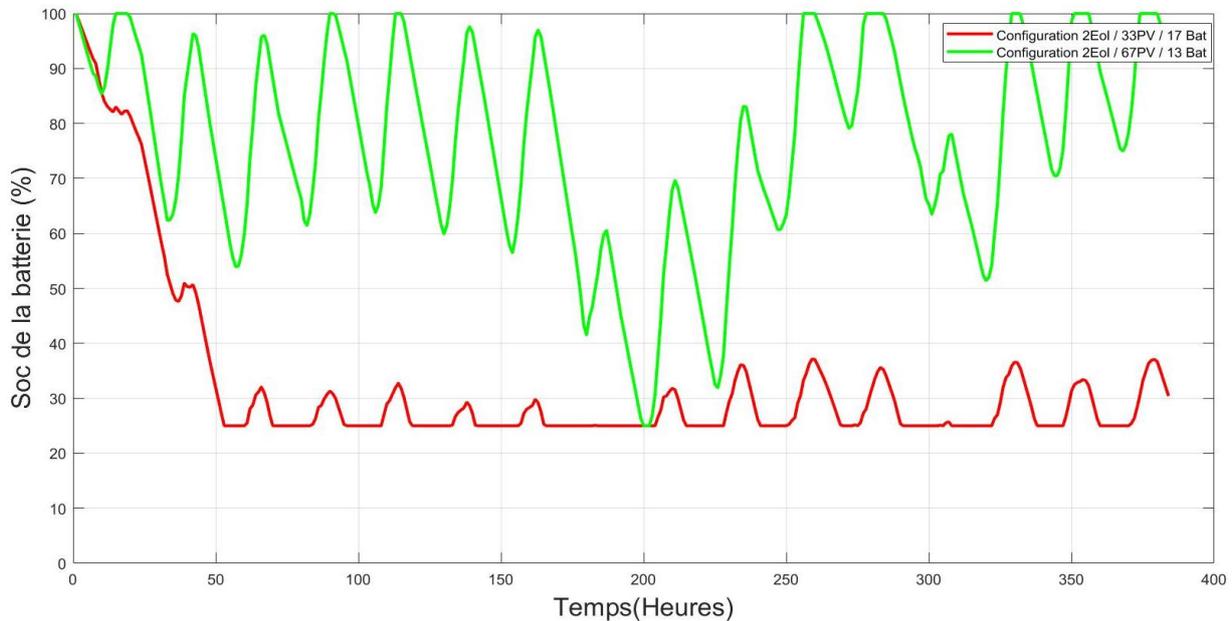


Figure 4.12 : SOC pour les deux configurations « optimale 1 » et « optimale 2 »

La figure ci-dessus représente l'état de charge du parc de batteries des deux combinaisons optimale 1 comportant (33PV/2Eoliennes/17Batteries) représentée en rouge et la configuration optimale 2 comportant (67PV/2Eoliennes/13Batteries) lorsqu'elles fonctionnent en parallèle pendant tout le mois avec les autres sources du SEH. On remarque bien que l'énergie issue des batteries intervient essentiellement durant la nuit, là où l'énergie solaire est absente et la demande de la charge est toujours présente. Une fois que l'irradiation solaire augmente durant la journée, les batteries se mettent à se charger et donnent le relais aux deux autres sources renouvelables pour fournir l'énergie exigée par la charge.

Il est concevable qu'on pourrait avoir un avis mitigé en comparant les deux illustrations, mais ceci illustre réellement que l'augmentation de la puissance nominale du générateur PV permet non seulement de réduire la taille des batteries de (17 à 13 batteries) mais également de protéger ces dernières en minimisant leur cycle de charge/décharge. Notons également que pour les deux configurations le seuil minimal de décharge (25%) n'est jamais dépassé.

La **figure 4.13** illustre un zoom sur l'état de charge des batteries de la configuration optimale 2

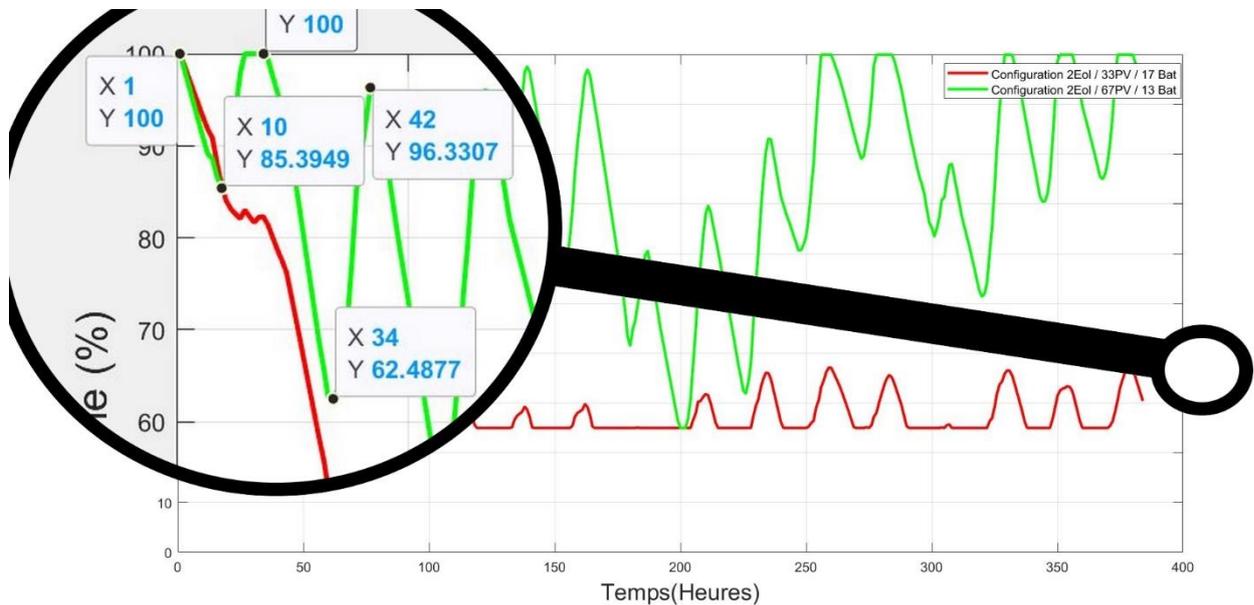


Figure 4.13 : Zoom sur le SOC de la configuration « optimale 2 »

A travers la figure mentionnée ci-dessus, on remarque l'évolution de la SOC des batteries de la configuration « optimale 2 ». Il est supposé que les batteries soient chargées à l'heure $t=1h$ (1h du matin du premier jour), l'état de charge descend jusqu'à 85% à 10h du matin du même jour. A partir de cette heure les batteries commencent à se charger par l'énergie excédentaire générée par les pics solaires. Il est à noter que les batteries sont pleines à 19h du soir et commencent à se décharger quand il fait nuit jusqu'à atteindre un état de charge de 62% à $t=34h$ (10h du matin du lendemain) puis elles vont se recharger une deuxième fois et vis versa.

4.5.2 Répartition des puissances par les générateurs :

Dans cette partie nous nous intéressons à distinguer la contribution de chacun des générateurs Eolien et PV pour les deux cas optimale 1 et optimale 2, afin de satisfaire la demande de la charge pour chaque heure.

Les **figures 4.14** et **4.15** représentent respectivement le profil de puissance générée par chacun des générateurs ainsi que celui de la charge pour toutes les heures du mois.

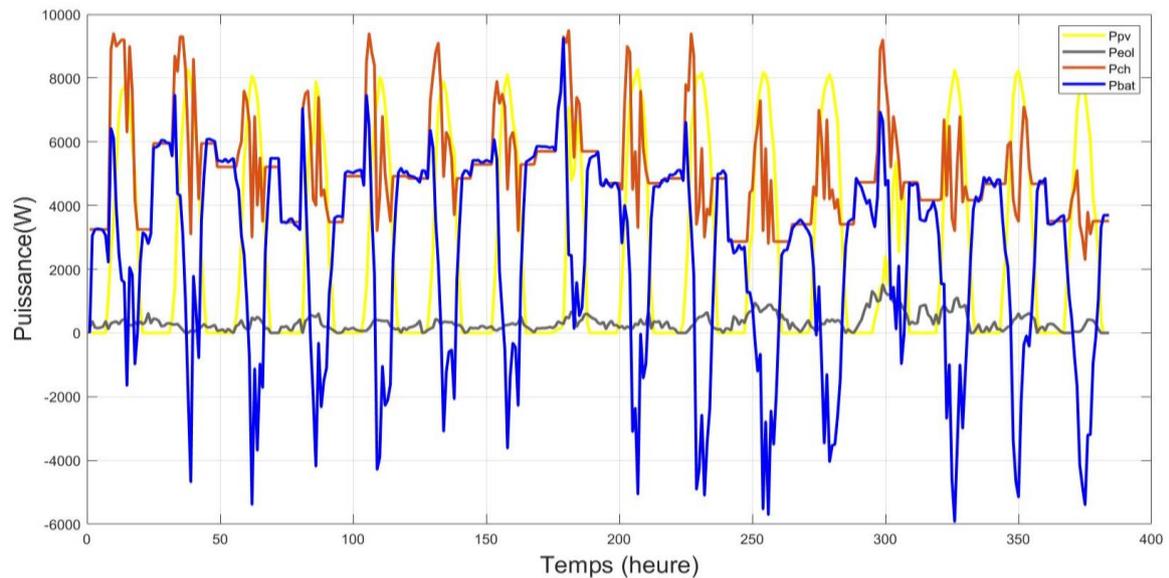


Figure 4.14 : Profil de puissance des différents générateurs et la charge config « optimale 1 »

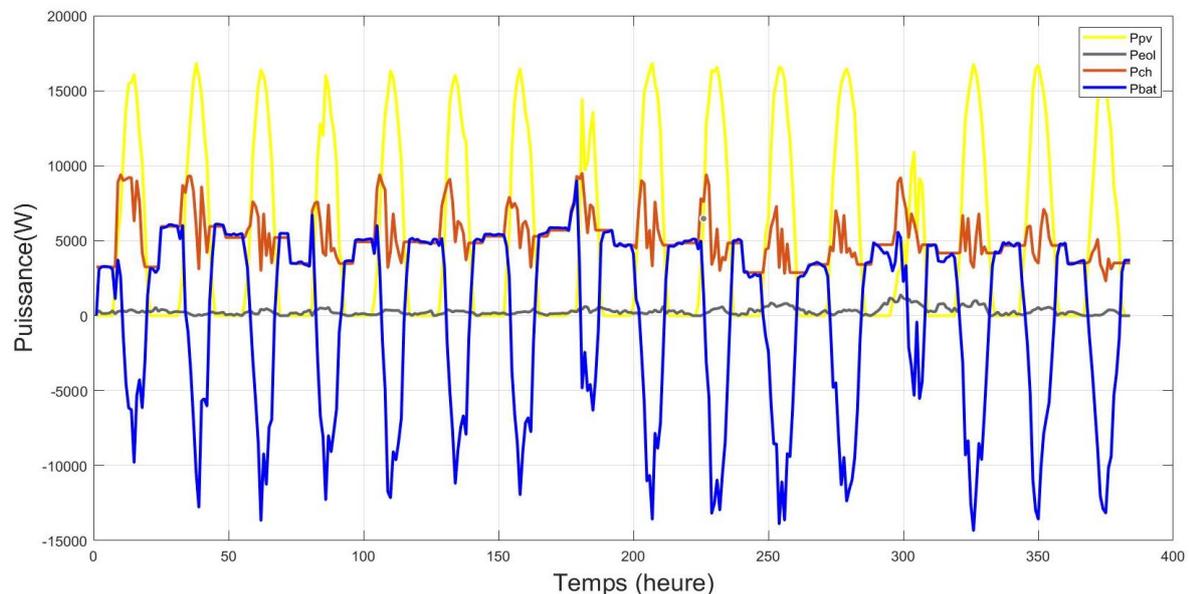


Figure 4. 15 : Profil de puissance des différents générateurs et la charge config « optimale 2 »

On remarque bien que le potentiel PV est prédominant, et que la contribution du générateur PV est la plus importante, d'où la forte dominance PV dans nos configurations optimales choisies, ajouté à cela. La contribution du parc de batteries qui comble le besoin de la charge en cas

d'absence du soleil (mauvais temps, intempérie), le profil éolien quant à lui est très restreint, et n'apporte que peu de puissance à notre SEH.

Notons que pour la configuration optimale 1, la dépendance du parc de batteries est très importante, imposant ainsi des seuils de charge très bas, qui se traduit par des SOC bornés, et donc une mauvaise préservation de la durée de vie des batteries à long terme.

Quant à la configuration optimale 2 la contribution de la batterie n'intervient qu'en cas d'absence totale ou partielle de l'ensoleillement (durant la nuit ou quand le temps est mauvais). Hormis la forte demande de la charge durant le jour, la forte puissance solaire disponible permet de suffire à la fois la demande de la charge et de recharger les batteries en même temps (durant les pics solaires) de ce fait, le SOC reste toujours à un niveau élevé, comme le montre la **figure 4.12**.

Les **figures 4.16 – 4.17** montrent la contribution de chaque composant du SEHR pour les deux configurations optimale 1 et optimale 2 :

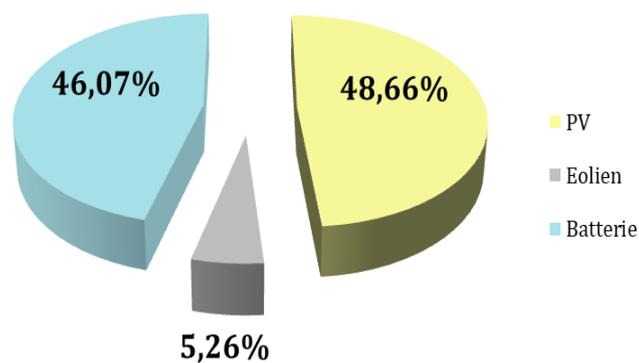


Figure 4.16 : Contribution de chaque composant du SEHR (configuration optimale 1)

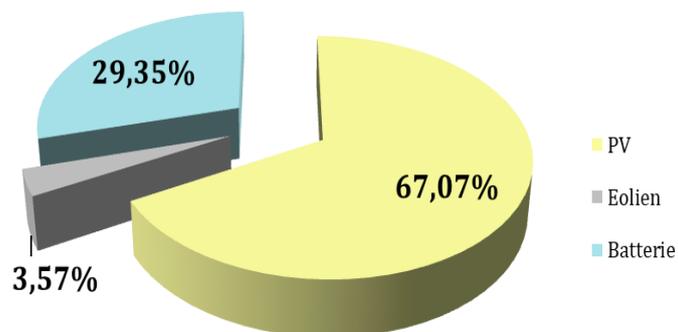


Figure 4.17 : Contribution de chaque composant du SEHR (configuration optimale 2)

- Il est clair à travers les **figures 4.16 – 4.17** que le taux de dépendance global du dispositif de stockage (batteries) est très élevé (de l'ordre de 46,07%) pour la première configuration « optimale 1 »,
- Pour la deuxième configuration « optimale 2 », la dépendance est nettement inférieure par rapport à la configuration « optimale 1 », de l'ordre de 29,35%.
- La contribution du dispositif de stockage est réduite en optant pour la configuration « optimale 2 » car au-delà de ce seuil, la minimisation de la capacité de stockage en utilisant l'algorithme que nous avons adopté, n'est plus possible,
- Notons que notre système est en site isolé « Off-Grid » donc le recours au stockage est indispensable.
- Le taux de participation de l'énergie éolienne est le plus faible seulement (5,26% et 3,57%) ceci est dû au faible potentiel qui ne représente pas le potentiel réel de la région connue par des vitesses de vent plus que celles relevées du site Global Wind Atlas. Par conséquent l'introduction d'un système automatisé pour relever les données réelles est nécessaire pour la fiabilité du système.

4.5.3 Calcul de l'autonomie du SEHR :

Pour le calcul de l'autonomie de notre SEHR, nous avons pris le pire scénario possible. (« la journée n°08 (**Tableau 4.4**) » la plus défavorable avec le plus haut pique de charge. L'énergie demandée durant 24h valant $E_c=155,7\text{kWh}$).

L'autonomie est calculée en utilisant l'équation 3.7 du chapitre 3 :

Tableau 4.4 : Mesures de la consommation de la charge pour le jour le plus défavorable

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Energie totale consommée (kWh)
E_c	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	7.1	7.6	9.3	9.1	
heure	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	155,7
E_c	9.5	7.5	5.5	7.4	7.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	

La configuration optimale 1 comporte 17 batteries de 12 kWh ce qui équivaut à une énergie stockée valant 204 kWh. Rappelons que le DOD_{max} est fixé à 75% et le η_t est pris à 1 pour raison de simplification de calcul :

$$D_S = \frac{B_{rc} \cdot DOD_{max} \cdot \eta_t}{E_c} = \frac{204 \cdot 0.75}{155,7} = 0,983 \text{ jour} \cong 1 \text{ journée}$$

La configuration optimale 2 comporte 13 batteries de 12 kWh ce qui équivaut à une énergie stockée valant 156 kWh.

$$D_S = \frac{B_{rc} \cdot DOD_{max} \cdot \eta_t}{E_c} = \frac{156 \cdot 0.75}{155,7} = 0,7515 \text{ jour} \cong 18 \text{ heures}$$

L'autonomie est un facteur déterminant pour la fiabilité de notre SEHR, elle est estimée pour le premier cas « optimal 1 » à 1 journée et pour le deuxième cas « optimal 2 » à 18 heures avec une absence totale de toutes les ressources renouvelables. Grâce à cette autonomie, notre système pourra s'autoalimenter et ainsi subvenir aux besoins de la charge et ce malgré les intermittences ou intempéries auxquelles il est confronté.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement et l'avantage du SEHR, nous nous proposons de simuler simultanément la demande de la charge ainsi que l'énergie totale produite par le SEHR à configuration optimale 2 avec un rendement à 95% des convertisseurs et donc une différence de puissance qui représente les pertes

Pour ce faire, la **figure 4.18** illustre la satisfaction des besoins de la charge avec un rendement 95% des convertisseurs pour chaque heure du mois :

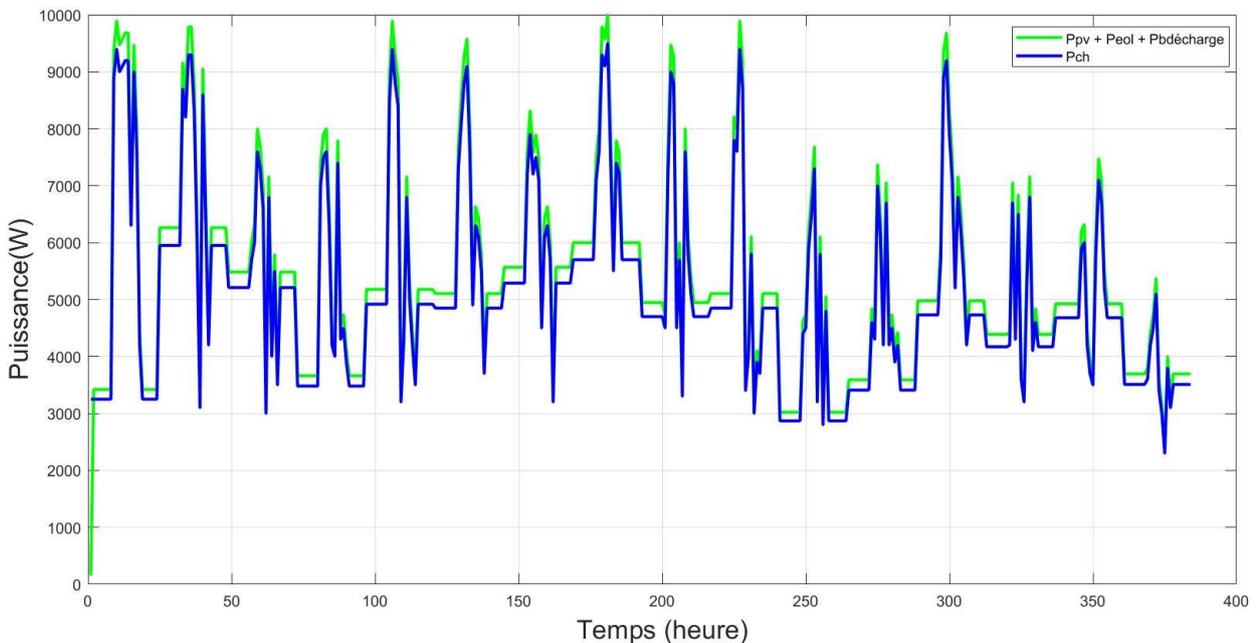


Figure 4.18 : Evolution de la puissance de la charge et celle du SEH adopté

Il est clair que pour chaque heure, l'équilibre entre l'alimentation et la charge est vérifié, ceci montre la fiabilité de la configuration du SEHR adoptée.

4.6 Intérêt économique :

Dans la continuité de notre étude technique, une brève approche économique est plus que nécessaire afin de donner une dimension plus concrète à notre travail.

L'étude sur laquelle s'est portée notre travail et en particulier l'algorithme que nous avons utilisé vise à réduire au maximum la capacité de stockage tout en ayant une autonomie nécessaire pour répondre aux besoins instantanés de la charge. Cette réduction du stockage nous permettra de limiter et de minimiser les frais de remplacement, et par ailleurs le coût global de notre SEHR.

L'algorithme d'optimisation nous a permis d'établir également une approche liée au coût total de l'installation du SEH, à court, moyen et long terme,

Les **tableaux 4.5 – 4.6** ci-dessous sont le résultat d'une simulation sous MATLAB. Ils reflètent le coût initial ainsi que le coût sur 10 et 25 ans d'exploitation pour la configuration optimale 1 dotée de 33 PV/2 Eoliennes /17 Batteries et la configuration optimale 2 et configuration dotée de 67PV/2 Eoliennes/13 batteries

Tableau 4.5 : Coût initial / Coût sur 10 ans / Coût sur 25 ans du SEHR pour la configuration optimale 1

<u>N_PV</u>	<u>N_Eol</u>	<u>N_BAT</u>	<u>Cout_Initial_euro</u>	<u>Cout_10_ans_euro</u>	<u>Cout_25_ans_euro</u>
33	2	17	20478	40886	97381

Tableau 4.6 : Coût initial / Coût sur 10 ans / Coût sur 25 ans du SEHR pour la configuration optimale 2

<u>N_PV</u>	<u>N_Eol</u>	<u>N_BAT</u>	<u>Cout_Initial_euro</u>	<u>Cout_10_ans_euro</u>	<u>Cout_25_ans_euro</u>
67	2	13	17988	34001	77813

Nous pouvons dire que l'objectif visé par notre algorithme a été atteint, une minimisation du parc de batteries a induit des coûts de remplacements maîtrisés et donc un coût d'investissement global à long terme optimisé en respectant les consignes et critères techniques (défaillance nulle et aucun rejet de la charge) et l'approche économique.

4.7 Comparaison avec les travaux précédents :

Afin de prouver l'efficacité de notre étude, nous avons fait une comparaison avec les résultats obtenus par nos confrères [91], qui ont mené le même travail sur le même site avec une approche de dimensionnement différente « PSO-AG » les points les plus pertinents à citer sont :

- Le dimensionnement des composants du SEH a été étudié par une évaluation suivant une journée représentative,
- Les scénarios proposés se basaient essentiellement sur des valeurs moyennes de consommation de la charge sans tenir compte des pics de consommations,
- Des défaillances ont été enregistrées lors du choix des scénarios sans autonomie.

La valeur ajoutée de notre étude par rapport à l'étude antérieure réside dans les points suivants :

- Notre dimensionnement a été établi en prenant en compte des valeurs de consommation, d'éclairage, de vent, et de température pour chaque heure durant un mois : ceci reflète plus concrètement les aléas météorologiques, et climatiques auxquelles ont été exposées nos mesures. Cette étude tient compte également des pics de charge enregistrés lors de la forte consommation du bloc administratif de la SARL,
- En se basant sur des mesures horaires, et en appliquant l'algorithme d'optimisation qui est mis à jour pour chaque heure, nous avons constaté et confirmé le faible potentiel éolien sur le site étudié, en revanche ce dernier a démontré l'excellent potentiel solaire ce qui justifie le choix de notre configuration à forte dominance PV,
- Les configurations que nous avons choisies sont beaucoup plus réalistes, car elles s'accordent avec les profils de chaque heure des ressources disponibles pendant la période d'étude.
- La contribution du parc des batteries est bien remarquable durant toute la période de la sollicitation,
- Le seuil de décharge minimal des batteries a été respecté durant toute la durée de l'étude afin de les préserver et d'allonger leur cycle de vie,
- La contribution globale de chaque générateur a été enfin générée dans une vision de management et de gestion des ressources énergétiques.

4.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord énumérer les différents potentiels éolien / solaire et de température disponible sur le site de la SARL Boublenza. Des mesures détaillées ainsi que des figures ont été présentés afin d'illustrer toutes les données collectées. Nous avons ensuite appliqué l'algorithme de dimensionnement afin de développer et de trouver la configuration optimale chaque composant de notre SEHR. Différentes approches, et différentes configurations ont été abordées afin de mieux cerner le choix optimal qui puisse satisfaire les meilleures critères requis. La configuration optimale choisie (à forte dominance PV) comporte 67 panneaux photovoltaïques, 2 Eoliennes et 13 batteries, cette dernière répond parfaitement à toutes les sollicitations qu'elles soient techniques (0 défaillance et 0 rejet de la charge) ou économiques (coût minimal). Finalement, la participation des ressources dans une perspective de gestion et de management a été établi, pour montrer l'apport de chaque ressource et sa contribution dans le système.

Conclusions générales

Dans ce mémoire nous avons traité la problématique du dimensionnement optimal d'un système énergétique hybride en se basant sur un algorithme itératif. Le travail réalisé est un cas d'étude réel pour l'alimentation du bloc administratif de la SARL BOUBLENZA située à Tlemcen. Les résultats obtenus ont démontré leur fiabilité grâce à la configuration optimale proposée qui répond parfaitement aux critères techniques et économiques.

Nous avons abordé en premier lieu des généralités sur les systèmes énergétiques renouvelables, la problématique de leur implantation et la nécessité de l'hybridation. Ensuite, nous avons présenté les technologies les plus récentes des générateurs à base des énergies renouvelables, en termes de matériaux utilisés, de gain en puissance, et de nouveautés par rapports aux technologies traditionnelles. Entre autre, nous avons montré que la complémentarité du potentiel éolien et solaire d'une zone donnée peut considérablement réduire la capacité de stockage d'énergie et améliorer les performances des systèmes énergétiques hybrides. Dans ce contexte, une méthodologie technico-économique intégrée pour l'évaluation des systèmes électriques hybrides éoliens et photovoltaïques a été développée, visant à la désignation des configurations optimales pour l'alimentation du bloc administratif de la SARL BOUBLENZA situé à Tlemcen.

Dans une perspective de préservation de l'environnement et de la planète, la nécessité de faire recours à des sources d'énergie vertes s'impose, cependant, comme nous l'avons abordé dans la problématique, ces types de ressources sont intermittentes et aléatoires. Il est donc primordial de se servir de la complémentarité des différentes ressources, d'où l'hybridation qui est une solution très prometteuse mais avec une complexité et un coût relativement élevé par rapport aux énergies fossiles.

L'industrie continue à améliorer le rendement de la conversion des énergies solaire et éolienne afin de les rendre plus compétitives et efficaces. La technologie solaire photovoltaïque est l'une des technologies renouvelables qui a le potentiel de façonner un système électrique propre, fiable, évolutif et abordable pour l'avenir. Des activités de recherche récemment publiées sur les PV solaires montrent que plusieurs nouvelles technologies sont meilleures que les anciennes en termes d'efficacité, coût énergétique et durée de vie. Parmi les technologies des panneaux PV, on trouve le bifacial, demi-cellule, bi-verre et le multi-busbars. De même, le monde des éoliennes vient de dévoiler le concept de nouveaux aérogénérateurs d'impact environnemental et visuel très réduit par rapport aux éoliennes classiques comme les éoliennes flottantes à implanter dans la mer de 200 mètres de profondeur, éoliennes volantes, éoliennes sans pales et autres de poche pour charger les téléphones mobiles.

Le dimensionnement des différents dispositifs d'un système hybride de production d'énergie est critique et nécessite une étude approfondie des données météorologiques changeant toutes les heures, afin d'avoir une configuration fiable et économiquement viable. Dans ce but, l'algorithme de calcul développé permet une analyse des paramètres du système hybride suivant les profils horaires de la production et de la demande du site d'étude. Les courbes de la variation de la capacité du stockage en fonction puissance éolienne obtenus permettent d'aboutir à une configuration optimale à forte dominance des panneaux PV. La participation de la puissance éolienne est faible mais elle contribuera à la fiabilité du système énergétique adopté et par ailleurs à la réduction du coût global de l'installation. Un surdimensionnement de la puissance PV permet non seulement la réduction de la taille des batteries mais aussi une préservation de leurs performances (réduction des cycles de charge et décharge) ce qui prolonge leur durée de vie et donc réduit leur coût de remplacement à long terme.

Perspectives

Dans une perspective de développement de notre travail, nous souhaiterions élargir les données récoltées sur une année ou plus afin de pouvoir évaluer le SEH sous toutes les contraintes météorologiques et climatiques auxquelles il devrait faire face, et en l'occurrence donner plus de fiabilité aux résultats que nous avons obtenus.

Nous proposons également de fusionner l'algorithme que nous avons utilisé avec une approche multi-objectif prenant en compte plusieurs contraintes simultanément (satisfaction des besoins de la charge/limitation des émissions de GES/minimisation du coût global d'investissement).

Nous souhaiterions également intégrer les nouvelles technologies du solaire photovoltaïque et éolien abordées dans le CHAPITRE 2 dans une perspective de gain en puissance et efficacité afin de tirer profit au maximum de chaque générateur.

Nous envisageons également l'étude de gestion et management entre les différentes ressources vue leur éventuelle complexité et leur nombre qui sera certainement conséquent en cas d'extension future de la SARL.

Bibliographie

- [1] BP Energy Outlook Edition 2018. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.bp.com.
- [2] Murat Cetin et al : The impact of economic growth, energy consumption, trade openness, and financial development on. Environmental Science and Pollution Research, 2018.
- [3] F. Barbieri, S. Rajakaruna et A. Ghosh : Very short-term photovoltaic power forecasting with cloud modeling. Renewable and sustainable Energy Reviews, 2017.
- [4] Arceo A, Biswas WK et Rosano M : Review of Tools for Sustainability Assessment of Renewable Energy Technologies for Remote Area Power Supply. J Fundam Renewable Energy, 2018.
- [5] C. Koroneos, A. Dompros et G. Roumbas : Renewable energy driven desalination systems modelling. J. Clean, 2007.
- [6] T. Jamal, T. Urmee et G.M. Shafiullah : Planning of off-grid power supply systems in remote areas using multi-criteria decision analysis. Energy, 2020.
- [7] Hybrid Wind and Solar Electric Systems Edition 2015. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.energy.gov.
- [8] Solar Hybrid Power System 2020. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : en.wikipedia.org/wiki/Solar_hybrid_power_systems.
- [9] J. Lian et al : Recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. Energy Conversion and Management, 2019.
- [10] T. Jamal : An innovative planning approach to improve PV integration into remote electricity networks. Discipline of Engineering and Energy, Murdoch University, 2019.
- [11] Les systèmes photovoltaïques : Guide de l'acheteur. Division de l'énergie renouvelable et électrique. Ottawa, Canada, 2002.
- [12] Toual BELKACEM : Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable. Mémoire de Magister, 2010.
- [13] M. JOURIEH : Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [14] F. POITIERS : Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [15] Zoheir TIR : Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade. Mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [16] M. Joulié : Mécanismes de dissolution de matériaux actifs d'électrodes de type $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ d'accumulateurs Li-ion en vue de leur recyclage. Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure de Chimie Montpellier, 2015.
- [17] CEA 2006. [Siteweb], consulté le : Mai 2021. URL : www.cea2006.com.
- [18] Groupe électrogène industriel. [Siteweb], consulté le : Mai 2021. URL : www.hellopro.fr.

- [19] Ludmil Stoyanov : Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Thèse de doctorat Université Technique de Sofia, 2011.
- [20] P.E. Akhator et A.I. Obanor : Synthesis gas production in a downdraft biomass gasifier for use in internal combustion engines in Nigeria. Applied Sciences and Environmental Management, 2018.
- [21] Zini, Tartarini, Ntziachristos et al : Wind-hydrogen energy stand-alone system with carbon storage, Modeling and simulation. Renewable Energy 35, 2010.
- [22] Said Diaf : Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar. Revue des Energies Renouvelables Vol. 9, N°3 2006.
- [23] J. Munoz : First operating year of two village PV-diesel plants in the south of Morocco. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, Juin 2004.
- [24] Muljadi Ulleberg et Pryor Garcia et Weisser : Parallel operation of wind turbine, fuel cell, and diesel generation sources. Conference IEEE-Power Engineering Society 2004.
- [25] El-Tamaly et Mohammed : New Software for Hybrid Renewable Energy Assessment for Ten Locations in Saudi Arabia. J renew sustain energy 5, 2013.
- [26] Bernal-agustín, J. L., Dufo-lopez, R, et Rivas-Ascaso, D. M : Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. Renewable Energy 31, 2006.
- [27] Dufo-lópez, R. Bernal-agustín et al : Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV – wind – diesel system. Applied energy elsevier, 2011.
- [28] Agence Internationale de l'Energie : World Energy Outlook Éditions OCDE, Paris, 2015.
- [29] Tyagi et al : Progress in solar PV technology, Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [30] Chapin et al : Analysis of record photovoltaic efficiencies. IEEE Xplore, 1954.
- [31] National renewable energy laboratory : Workshop Utility scale PV variability, Ullal 2009.
- [32] Advantages for cut-cells on solar module 2019. [siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.dsnsolar.com.
- [33] Shravan K. Chunduri : Larger Wafer-based Solar Cells and Modules. Head of technology. Webinar TaiyangNews, 2019.
- [34] Byeong Gwan Bhang et al : Power Performance of Bifacial c-Si PV Modules with Different Shading Ratios. IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, 2019.
- [35] A. Asgharzadeh et al : A sensitivity study of the impact of installation parameters and system configuration on the performance of bifacial PV arrays. IEEE J. Photovolt., vol. 8, no. 3, pp. 798–805, May 2018.
- [36] H. Cha et al : Power prediction of bifacial Si PV module with different reflection conditions on rooftop. Applied Science, Article no1752, Oct 2018.
- [37] G. J. M. Janssen et al : Aspects of bifacial cell efficiency. Energy Procedia, vol 124 pp. 76–83, September 2017.
- [38] B. B. Van Aken : White bifacial modules–improved STC performance combined with bifacial energy yield. Photovoltaïque, Solar Energy Conference. Germany, Jun 2016..
- [39] J. Stein : Final project report: Performance models and standards for bifacial PV module technologies. Sandia National Laboratory Albuquerque, USA, 2018.

- [40] V. Shanmugam et al : Impact of the manufacturing process on the reverse bias characteristics of high-efficiency n-type bifacial silicon wafer solar cells. *Solar Energy Material, Solar Cells*, vol. 191, pp. 117–122, 2019.
- [41] Ran. Fu, R. Margolis et D. Feldman : US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2018. National Renewable Energy Laboratory, 2018.
- [42] Shravan K. Chunduri : Bifacial Solar Technology. plateforme d'études de marché Tayaing, 2021.
- [43] Les Modules Bi-verre Vision. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : https://www.solarwatt.com/-/media/website-en/mediacenter/brochures/solar-panels/solarwatt-brochure-modules-vision_screen_fr.pdf?dl=1.
- [44] Romain Couderc et al : Encapsulant for glass-glass PV modules for minimum optical losses: Gas or EVA. *Energy Procedia*, 2017.
- [45] A. Herguth, S. Braun, G. Hahn, C. Poenisch, R. Nissler et D. Habermann : Towards non-permanent contacting schemes for busbarfree solar cells. *Photovoltaic Solar Energy conf*, 2013.
- [46] S. Braun et al : Solar Cell Improvement by using a Multi Busbar Design as Front Electrode. *Energy Procedia*, 2012.
- [47] L'avantage des nouveaux panneaux solaires 9BB. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.eco-greenenergy.com/fr/standard-5bb-vs-half-cut-cells-9bb-the-advantage-of-new-9bb-pv-module.
- [48] Barlas TK et Van Kuik GAM : State of the art in smart rotor control research for wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010.
- [49] RH. Crawford : Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009.
- [50] Mejia ER, Filipek JW, Tovar Salazar et J. A cheap : reliable and efficient regulator for small horizontal-axis wind-turbines. *Applied Energy*, 2003.
- [51] H. Snel : Review of the present status of rotor aerodynamics. *Wind Energy*, 1998.
- [52] CJ. Baker : Wind engineering past, present and future. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007.
- [53] H. Garrad : Offshore wind turbines: design and availability. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.allenergy.co.uk/userfiles/file/Colin_Morgan210508.pdfS.
- [54] M. Balat : A review of modern wind turbine technology. *Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2009.
- [55] A. Maheri, S. Noroozi, J. Vinney : Application of combined analytical/FEA coupled aero-structure simulation in design of wind turbine adaptive blades. *Renewable Energy*, 2007.
- [56] A. Martinez et P. Prats : Wind technology issues. *Renewable Energy*, 1999.
- [57] B. Stefan ,E. Steve et R. Yegor : Breeze Farmer An open-source bike wheel wind turbine, 2012.
- [58] D. Milborrow : Wind energy technology—the state of the art. *Journal of Power Energy*, 2002.
- [59] HS. Toft et JD. Sorensen : Reliability-based design of wind turbine blades. *Structural Safety*, 2011.
- [60] M. Ragheb : Control of wind turbine. University of Illinois at Urbana-Champaign USA, 2009.
- [61] AD. Hansen, P. Sorensen, F. Iov et F. Blaabjerg : Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators. *Renewable Energy*, 2006.

- [62] DWIA : Power control of wind turbines. Renewable Energy, 2012.
- [63] J. Leishman : Challenges in modelling the unsteady aerodynamics of wind turbines. Wind Energy, 2002.
- [64] La spectaculaire évolution technologique des éoliennes. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : <https://www.revolution-energetique.com/spectaculaire-evolution-technologique-des-eoliennes>.
- [65] Bilan électrique 2015 de RTE - Connaissance des énergies. Bilan disponible sur : https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bilan_electrique_2015_rte.pdf.
- [66] Highest performance Using wind energy efficiently. [Siteweb], consulté le : Mai 2021. URL : mbrenewables.com/en/.
- [67] H. Boudounit, Mostapha Tarfaoui, D. Saifaoui : Étude numérique d'une pale composite d'une éolienne flottante en service. 13ème Congrès de mécanique, Meknès, Maroc, 2017.
- [68] B. Attaf : Towards the Optimisation of the Ecodesign Function for Composites. JEC COMPOSITES MAGAZINE, 2008.
- [69] B. Attaf : Probability Approach in Ecodesign of Fibre-Reinforced Composite Structures. Congrès Algérien de Mécanique, Biskra, Algérie, 2009.
- [70] G. Marsh : Composites help improve wind turbine bree. Reinforced Plastics, 2005.
- [71] H. Ounis : Etude numérique par éléments finis de l'effet de la température sur la vibration et la stabilité des plaques stratifiées. Thèse de doctorat université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [72] La plus grande pale d'éolienne au monde 2012. Article rédigé par Aurore, [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.consoglobe.com.
- [73] Fiche pédagogique éolienne en mer off-shore 2018. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.connaissancedesenergies.org.
- [74] La première éolienne flottante Floatgen de 2 MW, équipée de la fondation flottante Ideol. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.bfmtv.com.
- [75] Eolienne sans pales 2019. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.wikipedia.org.
- [76] Eolienne vibrante sans pales 2021. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.ouest-france.fr.
- [77] V A Vinayan et al. Design of Aeroelastic Wind Belt for Low-Energy Wind Harvesting. IOP Conference Series, Earth and Environmental Science, 2019.
- [78] Uwe Ahrens, Morits Diehl. Springer 2013th edition 2013. Livre : Airborne Wind Energy, 2013.
- [79] R. Luna-Rubio et al : Optimal sizing of renewable hybrids energy systems. A review of methodologies. Solar Energy 86, 2012.
- [80] Shakti Singh, Mukesh Singh & S. C. Kaushik : A Review on Optimization Techniques for Sizing of Solar-Wind Hybrid Energy Systems, International Journal of Green Energy, 2016.
- [81] Awodugba et al : Photovoltaic solar cell simulation of shockley diode parameters in matlab. International journal of physical science, 2013.
- [82] ZT-300p-310p. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : zytechsolar.com.
- [83] Turbine éolienne domestique. [Siteweb], consulté le : Juin 2021, URL : www.amazon.fr.

- [84] A. Benjamaa : Coopérations Meta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride. Thèse de doctorat, Université de reims, 2015.
- [85] Solar batteries 48V 250Ah lithium ion. [Siteweb], consulté le : Juin 2021. URL : www.french.alibaba.com.
- [86] https://www.alibaba.com/product-detail/10kw-Off-Grid-Solar-Inverter-10kw_60567421809.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.34e779a4ICFyV9&s=p.
- [87] Kaldellis, J.K,Zafirakis, D,Kavadias,K : Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.
- [88] J.K. Kaldellis et al : Renewable energy applications in Greece - What is the public attitude?. Energy Policy 42, 2012.
- [89] Abdullrahman alshammaa et khaled addoweesh : Optimum sizing of hybrid pv/wind/battery/diesel system considering wind turbine parameters using genetic algorithm. IEEE international conference on power and energy, 2012.
- [90] Anémomètre avec girouette. [Siteweb], consulté le : Mai 2021. URL : www.anemometre.org.
- [91] Amoura Yahia et Benlakehal Mohamed Amine et Al : Dimensionnement optimal par Algorithme génétique et essaim particuliers d'un système énergétique hybride. Mémoire d'ingénieur, 2020.