

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 في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : ENERGIES ET ENVIRONNEMENT

Présenté par :
CHARIF Mustapha
BENMELOUKA Ahmida

Thème

**Etude technique d'un système
énergétique hybride à base des**

Soutenu publiquement, le 15/09/2022 , devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------|------------|------------------|--------------------------|
| Mme I.BOUSMAHA | MCB | ESSA. Tlemcen | Président |
| M A.KERBOUA | MCB | ESSA. Tlemcen | Directeur de mémoire |
| M F.BOUKLI-HACENE | Professeur | ESSA. Tlemcen | Co- Directeur de mémoire |
| M A.TAHOUR | Professeur | ESSA. Tlemcen | Examineur 1 |
| M A.CHEMIDI | MCA | ESSA. Tlemcen | Examineur 2 |

Année universitaire: 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ma chère mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et mon considération pour les sacrifices qu'elle nous a consenti, et pour tous ses efforts qu'elle nous a apporté. Qu'Allah la protège et la Procure santé et longue vie.

À la mémoire de mon cher père, qu'il m'a toujours poussé et motivée dans mes études et qui m'a doté d'une éducation qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

À mon petit frère Yasser

*À toute la famille Benmelouka et la famille Cerra
Cheraka.*

À mon chère amie Alya qui a partagé mes souvenirs et m'a soutenu durant ces années d'études

À tous mes amis et mes collègues

BENMELOUKA Ahmida

Dédicace

Je dédie cet humble travail

*À ma très chère mère, pour son soutien et ses
encouragements et tous les sacrifices qu'elle m'a enduré
qu'Allah la protège pour nous et la Procure santé et
longue vie*

*À mon cher père, pour tous les efforts qu'il nous a apporté
et tous ses sacrifices qu'Allah lui fasse miséricorde*

À mes adorables sœurs

*À toute la famille Charif en particulier mon oncle Adel et
la famille Sbai, à tous mes amis et mes collègues*

À toutes personnes que j'apprécie

Et mes collègues spécialement les électrotechniciens

CHARIF Mustapha

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de la patience, qu'il nous 'a donnée durant toutes ces années d'étude.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr « KARBOUA ABDELFEJAK » pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuuel durant toute cette période. Qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre Co-encadreur Monsieur « BOUKLE HACENE FOUAD » qui nous a bénéficié de ses compétences et disponibilité.

Nous remercions toute et tous les enseignants d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation par ailleurs, ainsi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin nous tenons à exprimer nos reconnaissances à tous nos amis pour le soutien moral et matériel.

Résumé

L'intégration des énergies renouvelables reste techniquement et économiquement avantageuse pour la production d'électricité dans les zones isolées. L'étude de faisabilité du dimensionnement des systèmes hybrides est une étape essentielle pour améliorer la bonne fiabilité de la production d'électricité. En effet, Le site de Tlemcen a un énorme potentiel d'énergie solaire. Les données météorologiques du site d'étude de notre cas ont conduit à l'adoption d'une configuration basée sur l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne en intégrant un banc de batteries pour pallier le problème d'intermittence. Cette étude présente un algorithme de dimensionnement très efficace DPSP pour trouver une bonne configuration pour la taille du système hybride tout en obéissant à l'aspect économique et aux contraintes imposées par les spécifications. Les résultats obtenus ont effectivement conduit à une configuration principalement d'origine solaire et l'éolienne ont permis, en plus de la réduction du coût d'installation des générateurs du système hybride.

Mots clés

Système énergétique hybride - Optimisation - dimensionnement - probabilité d'insuffisance de l'alimentation électrique - Système de stockage - Générateur photovoltaïque - Générateur éolien.

Summary

The integration of renewable energies remains technically and economically advantageous for the production of electricity in isolated areas. The feasibility study of the sizing of hybrid systems is an essential step to improve the good reliability of electricity production. In effect, The Tlemcen site has enormous solar energy potential. The meteorological data of the study site of our case led to the adoption of a configuration based on solar photovoltaic and wind energy by integrating a bank of batteries to overcome the problem of intermittency. This study presents a very efficient DPSP sizing algorithm to find a good configuration for the size of the hybrid system while obeying the economic aspect and the constraints imposed by the specifications. The results obtained effectively led to a configuration mainly of solar origin and the wind power allowed, in addition to the reduction of the cost of installation of the generators of the hybrid system.

Keywords

Hybrid energy system - Optimization - sizing - deficiency of power supply probability - Storage system - Photovoltaic generator - Wind generator.

ملخص

يظل تكامل الطاقات المتجددة مفيداً تقنياً واقتصادياً لإنتاج الكهرباء في المناطق المعزولة. تعد دراسة الجدوى لتحجيم الأنظمة الهجينة خطوة أساسية لتحسين الموثوقية الجيدة لإنتاج الكهرباء. في الواقع، يتمتع موقع تلمسان بإمكانيات هائلة من الطاقة الشمسية. أدت بيانات الأرصاد الجوية لموقع الدراسة الخاص بحالتنا إلى اعتماد تكوين يعتمد على الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح من خلال دمج بنك من البطاريات للتغلب على مشكلة التقطع. تقدم هذه الدراسة خوارزمية تحجيم DPSP فعالة للغاية لإيجاد تكوين جيد لحجم النظام الهجين مع مراعاة الجانب الاقتصادي والقيود التي تفرضها المواصفات. أدت النتائج التي تم الحصول عليها بشكل فعال إلى تكوين بشكل أساسي من أصل شمسي وطاقة الرياح المسموح بها، بالإضافة إلى تقليل تكلفة تركيب مولدات النظام الهجين.

الكلمات المفتاحية

نظام الطاقة الهجين – التحسين – التحجيم -نقص احتمال امدادات الطاقة – نظام التخزين – مولد الطاقة الكهروضوئية – مولد طاقة الرياح.

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. 1: Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol | 4 |
| Figure 1. 2: Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012) | 4 |
| Figure 1. 3: SEH à base de ressources conventionnelles/non conventionnelles | 5 |
| Figure 1. 4: le principe de la photovoltaïque | 6 |
| Figure 1. 5: Principe de fonctionnement du panneau solaire bifacial | 7 |
| Figure 1. 6: Comparaison des pertes joules entre une demi-cellule et une cellule complète..... | 8 |
| Figure 1. 7: Panneau standard à 60 cellules vs 120 cellules demi-coupées | 9 |
| Figure 1. 8: Structure de la cellule | 9 |
| Figure 1. 9: Cellule busbar | 10 |
| Figure 1. 10: Connexion des fils au cœur de la cellule | 10 |
| Figure 1. 11: Rayons descendant sur un onglet de busbars (à gauche) et sur un fil rond (à droite) | 10 |
| Figure 1. 12: Principaux organes du système de conversion éolien | 11 |
| Figure 1. 13: Les composants de l'éolienne Wind Belt | 12 |
| Figure 1. 14: Eolienne volante (Aéroportée) | 13 |
| Figure 1. 15: éolienne sans pales | 13 |
| Figure 1. 16: groupe électrogène..... | 14 |
| Figure 1. 17: principe de fonctionnement d'une batterie Li-Ion | 15 |
| Figure 1. 18: Architecture d'un SEH en bus CC. | 16 |
| Figure 1. 19: Architecture d'un SEH en bus CA. | 17 |
| Figure 1. 20: Architecture des (SEH) à bus à CC/CA | 17 |
| Figure 1. 21: SEH PV/Batterie..... | 18 |
| Figure 1. 22: SEH Eolien/Batterie. | 19 |
| Figure 1. 23: SEH Eolien/PV sans système de stockage | 19 |
| Figure 1. 24: SEH Eolien/PV avec système de stockage | 19 |
| Figure 1. 25: SEH PV-Eolienne-Générateur diesel | 20 |
| | |
| Figure 2. 1: Indicateurs de performance pour les SEH | 21 |
| Figure 2. 2: Diagramme regroupant différentes méthodes d'optimisation..... | 22 |
| Figure 2. 3: Contribution des algorithmes et méthodes d'optimisation les plus communément utilisés | 25 |
| Figure 2. 4: Organigramme global de l'algorithme de dimensionnement Erreur ! Signet non défini. | |
| | |
| Figure 3. 1: la distribution horaire de la puissance extraite par un panneau ZT300P..... | 36 |
| Figure 3. 2: la distribution horaire de la puissance extraite par l'éolienne EOL/3000 | 37 |
| Figure 3. 3: Le profil quotidien de la charge..... | 37 |
| Figure 3. 4: Etat de charge de batterie | 39 |

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Impact de la réflectance au sol 8

Tableau 3. 1: les données météorologique du site d'étude 35

Tableau 3. 2: les caractéristiques des composantes utilisées 36

Liste abrégations

SEH : Système énergétique hybride

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur Photovoltaïque

GaAs : Arséniure de gallium (Gallium Arseniure)

CdTe : Tellure de cadmium (Tellure de cadmium)

PERC: Passivated Emitter Rear Cell

DOD : Profondeur de décharge (Depth Of Discharge en anglais)

SOC: État de charge (State Of Charge)

CC : Courant continu

CA : Courant alternatif

DPSP : probabilité d'insuffisance de l'alimentation électrique (deficiency of power supply probability)

NOCT : Température nominale de fonctionnement de cellule (Nominal Operating Cell Temperature)

LPM : Linear Programming Model

PSO : Optimisation par essais de particules (Particle Swarm Optimization)

LS : Moindres carrées (Least squares en anglais)

AI : Intelligence artificielle (Artificial intelligence)

AG : Algorithme génétique

HSA: Algorithme harmonique (Harmony Search Algorithm)

SA : Simulated Annealing

TS : Tabu search

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes énergétiques hybrides | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Le potentiel énergétique en Algérie | 3 |
| 1.2.1 Gisement éolien | 3 |
| 1.2.2 Gisement solaire | 4 |
| 1.3 Les systèmes énergétiques hybrides (SEH) | 5 |
| 1.3.1 Les ressources d'énergies | 5 |
| 1.3.2 Les composants de systèmes énergétiques hybrides | 6 |
| I.3.2.1 Générateur photovoltaïque..... | 6 |
| I.3.2.2 Générateur éolien | 11 |
| 1.3.2.3 Le groupe électrogène | 13 |
| 1.3.2.4 Dispositif de stockage..... | 14 |
| 1.3.2.5 Les convertisseurs..... | 15 |
| 1.3.2.6 Les systèmes de supervision..... | 15 |
| 1.3.3 Les avantages d'un système énergétique hybride | 15 |
| 1.4 Architectures des systèmes énergétiques hybrides..... | 16 |
| 1.4.1 Architecture en bus continu (CC)..... | 16 |
| 1.4.2 Architecture en bus alternatif (CA) | 16 |
| 1.4.3 Architecture en bus (CA/CC)..... | 17 |
| 1.5 Les configurations des systèmes énergétiques hybrides fréquentes | 18 |
| 1.5.1 PV-Batterie | 18 |
| 1.5.2 Eolienne – Batterie | 18 |
| 1.5.3 PV-Eolienne-Batterie | 19 |
| 1.5.4 PV-Eolienne-Générateur diesel | 19 |
| 1.6 Conclusion..... | 20 |
| Chapitre 2 : Dimensionnement et modélisation | 21 |
| 2.1 Introduction | 21 |
| 2.2 Métriques de l'énergie hybride | 21 |
| 2.3 Les méthodes de Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides | 21 |
| 2.3.1 Outils logiciels..... | 22 |
| 2.3.1.1 HOMER :(Hybrid optimization method for electric renewable) | 22 |
| 2.3.1.2 HOGA :(Hybrid optimization by genetic algorithm)..... | 22 |

| | | |
|--|---|----|
| 2.3.1.3 | HYBRID2 | 22 |
| 2.3.1.4 | TRNSYS | 23 |
| 2.3.2 | Techniques conventionnelles | 23 |
| 2.3.2.1 | Programmation linéaire | 23 |
| 2.3.2.2 | Approche probabilité | 23 |
| 2.3.2.3 | La méthode des moindres carrées | 23 |
| 2.3.3 | Techniques d'optimisation non conventionnelles | 23 |
| 2.3.3.1 | Algorithme génétique (Genetic algorithm : GA) | 24 |
| 2.3.3.2 | Colonie de fourmi (Ant colony) | 24 |
| 2.3.3.3 | Algorithme de recherche d'harmonie (HSA) | 24 |
| 2.3.4 | Techniques d'optimisation hybride | 24 |
| 2.3.4.1 | Optimisation par essaims de particules (Particle swarm optimization : PSO) 24 | |
| 2.3.4.2 | Recherche de recuit simulé (Simulated Annealing (SA)-Tabu search (TS)) | 25 |
| 2.3.5 | Méthode itérative/AG | 25 |
| 2.4 | Les techniques et algorithmes les plus couramment utilisées dans les SEHR | 25 |
| 2.5 | Modélisation des composants du SEHR | 25 |
| 2.5.1 | Modélisation du générateur photovoltaïque | 25 |
| 2.5.2 | Modélisation du générateur éolien | 26 |
| 2.5.3 | Modélisation du système de stockage | 26 |
| 2.6 | DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME D'ENERGIE HYBRIDE | 28 |
| 2.6.1 | Description de la méthode DPSP | 28 |
| 2.6.2 | Algorithme du dimensionnement | 28 |
| 2.7 | Conclusion | 31 |
| Chapitre 3 : Résultats et Interprétations | | 32 |
| 3.1 | Introduction | 32 |
| 3.2 | Critère d'optimisation | 32 |
| 3.3 | Contraintes d'optimisation | 33 |
| 3.4 | Formulation du problème | 34 |
| 3.5 | Résultats et discussions | 34 |
| 3.5.1 | Prélèvement des données climatiques et de la charge du site | 35 |
| 3.5.2 | Dimensionnement du système de stockage | 37 |
| 3.5.3 | Dimensionnement optimal des générateurs | 38 |
| 3.6 | Conclusions | 39 |
| Conclusion générale | | 40 |

Introduction générale

La disponibilité d'énergie est une pré-obligation pour le développement socioéconomique et industriel d'un pays. L'Algérie comme le monde en voie de développement vit une époque sans précédent pour le secteur énergétique. La demande en énergie croît et va continuer de croître. La pression pour développer et transformer le système énergétique est immense. Cette pression s'aggrave par la conjonction de trois crises plus ou moins décalées dans le temps. La première crise est économique liée au fait que la demande augmente plus vite que l'offre. La deuxième crise est écologique liée à l'impact des énergies fossiles sur le climat et l'environnement. La troisième est géologique liée à un tarissement très proche des ressources pétrolières puis gazières qui sont aujourd'hui vitales pour l'économie de l'Algérie. L'anticipation de cette situation a poussé le gouvernement Algérien à construire un scénario énergétique qui aidera à renforcer l'exploitation des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables représentent assurément l'avenir en apportant des réponses durables, inépuisables et abordables. Le potentiel de l'énergie solaire en Algérie est bien sûr immense et est classé parmi les plus importants au monde. Les experts jugent qu'une utilisation d'une fraction de ce potentiel pourrait couvrir en principe tous les besoins en électricité de la population. Mais, le défi crucial reste l'intermittence qui est dû au caractère stochastique des variations de cette source. L'hybridation de cette dernière avec autre source renouvelable comme l'éolienne et un système de stockage même si elle est très complexe, présente par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité et leur souplesse de fonctionnement. Cependant, cette solution exige au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation et les informations précises sur la charge à fournir.

La procédure habituelle de dimensionnement consiste à définir le profil de puissance de la charge typique ou le plus défavorable au niveau du bus de charge principal et les données des énergies renouvelables correspondantes pendant un ou plusieurs jours comme base pour le dimensionnement des différents générateurs renouvelable et du système de stockage. Les paramètres météorologiques les plus défavorables se diffèrent d'un site à l'autre. En Algérie, la période de récupération du stockage est très courte par rapport aux autres pays où elle s'étend sur une plage de 10 à 20 jours. Ce qui signifie un coût d'investissement faible pour permettre au système de couvrir les besoins de la charge.

La région de Tlemcen regorge d'un potentiel énergétique du solaire et de l'éolien très important. En effet, la compétitivité accrue de ces énergies en termes de coûts et les préoccupations grandissantes du gouvernement Algérien au changement climatique ont motivé les gestionnaires de la SARL BOUBLENTA pour l'installation d'un système hybride composé d'un générateur photovoltaïque, générateur éolienne et un banc des batteries. Dans ce mémoire, une méthodologie de dimensionnement du point de vue technique et économique d'un tel système hybride est développée. Après l'enregistrement de données de variables météorologiques du site, la technique est employée pour identifier la configuration optimale de la taille du système énergétique afin de minimiser le coût de l'énergie de ce système hybride tout en satisfaisant les contraintes techniques comme la fiabilité de l'alimentation hybride et la bonne utilisation du complémentaire photovoltaïque et éolienne.

Dans ce travail, nous avons adopté la démarche suivante :

Nous avons commencé par les généralités sur le système énergétique hybride dans le premier chapitre où nous avons introduit le potentiel énergétique en Algérie puis nous avons présenté quelque technologie des composantes du système énergétique hybrides en parlant de leurs avantages, inconvénients pour mieux comprendre comment utiliser chacune de ces technologies. Ensuite nous avons abordé les différents architectures et configurations des systèmes énergétiques hybrides.

Dans le deuxième chapitre nous avons traité quelques méthodes de dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides. Nous avons vu également la modélisation du générateur photovoltaïque et éolienne

et le système de stockage. A la fin de ce chapitre nous avons fait une description de la méthode DPSP qui nous avons choisi pour notre travail.

En fin pour le troisième chapitre nous avons vu comment calculer le cout totale d'un système énergétique hybrides à base des énergies renouvelables pour le minimiser au maximum afin que notre système concurrencer les ressources conventionnelles

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes énergétiques hybrides

1.1 Introduction

L'homme est en constante évolution et ses besoins quotidiens changent de jour en jour afin de lui faciliter la vie, ce qui l'a poussé à construire des usines et diverses installations. Mais tout cela a fait augmenter la consommation d'énergie, ce qui a incité l'être humain à trouver des sources d'énergie propres et permanentes afin de pallier la pénurie des sources traditionnelles jusqu'à leur remplacement définitif.

Les sources d'énergie renouvelables se caractérisent par leur pureté, leur impact positif sur l'environnement et leur imperméabilité, ce qui en fait l'alternative idéale aux sources traditionnelles telles que l'énergie fossile et l'énergie nucléaire. C'est ce qui a poussé les scientifiques à se concurrencer pour les développer. Chacune de ces sources renouvelables a ses avantages et ses inconvénients, il est donc recommandé d'en combiner deux ou plusieurs types afin d'obtenir la plus grande capacité énergétique possible.

Le but de notre travail est d'utiliser une méthode numérique qui combine différentes sources d'énergie telles que l'énergie solaire et éolienne avec un système de stockage par batterie. Cette méthode garantit d'avoir le meilleur rendement énergétique au prix le plus bas possible.

1.2 Le potentiel énergétique en Algérie

L'Algérie bénéficie de nombreuses ressources renouvelables, dont l'énergie solaire, car elle possède les gisements solaires et les mines les plus riches du monde grâce à sa situation géographique. L'Algérie bénéficie également de nombreuses régions riches avec une bonne vitesse de vent. Il existe aussi d'autres sources telles que l'énergie de la biomasse, dont le potentiel est faible par rapport aux sources précédentes parce que la superficie forestière ne représente que 10% de la superficie totale du pays, et seulement 5% de celui-ci sont des pins et des kalitos, qui sont considérés parmi les types les plus importants dans la production d'énergie. L'Algérie compte plus de 200 sources chaudes, dont certaines chauffent à 119°C. L'hydroélectricité est l'une des sources gaspillées et celles qui ne sont pas bien exploitées en raison de leur taux d'évaporation élevé et de leur faible capacité de remplissage. Dans ce travail, nous allons nous concentrer sur les deux sources les plus rentables [1].

1.2.1 Gisement éolien

L'Algérie a un potentiel éolien considérable et surtout dans le sud où la vitesse du vent atteint jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar et environ 6m/s dans la région de Tindouf d'après les estimations de CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie, qui a permis d'identifier huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes :

- deux zones sur le littoral.
- trois zones sur les hauts plateaux.
- quatre zones en sites sahariens.

Ces zones peuvent produire 37 TWh/an [2].

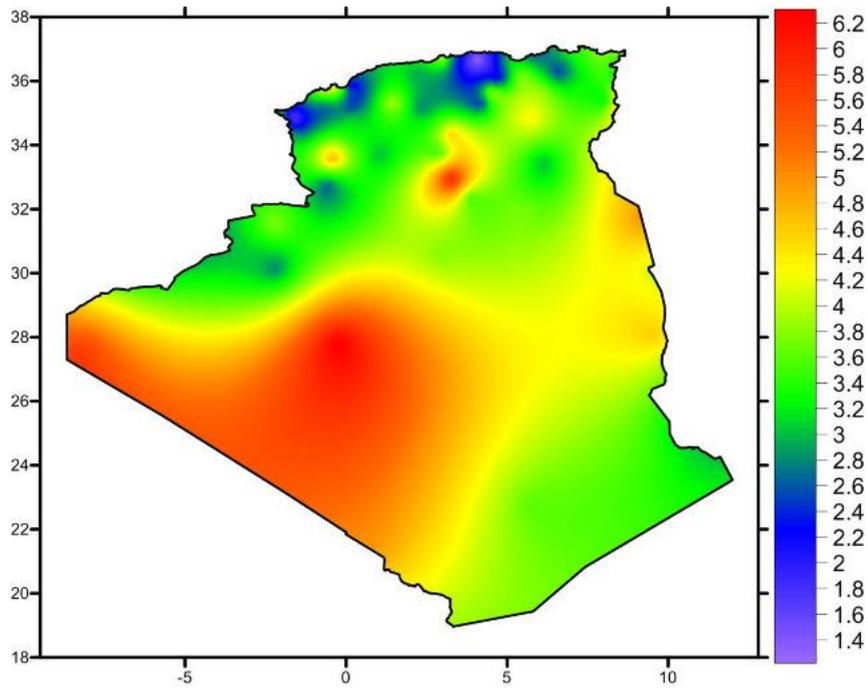


Figure 1. 1: Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol [3]

1.2.2 Gisement solaire

L'Algérie possède les gisements solaires les plus riches du monde, il dépasse 2000 heures par an et peut atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et les déserts. L'énergie atteint 5 kW/m² par heure, soit 1700kW/m² par an dans le nord du pays et 2263kW/m² dans le sud. L'Algérie est considérée comme le plus fort en termes de potentiel solaire dans la région méditerranéenne [1].

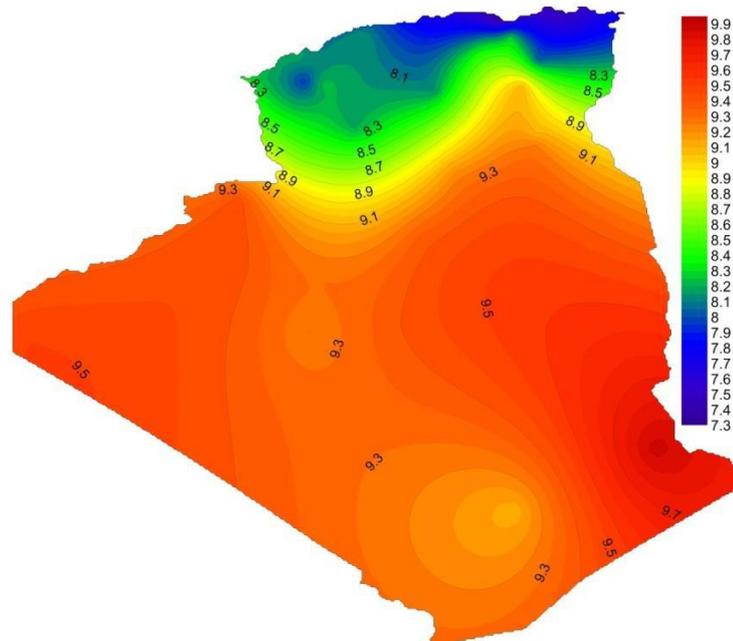


Figure 1. 2: Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012) [4].

1.3 Les systèmes énergétiques hybrides (SEH)

Pour assurer une efficacité énergétique dans un site autonome, il est préférable d'utiliser une combinaison des ressources renouvelables non-conventionnelles, ressources conventionnelles et un dispositif de stockage.

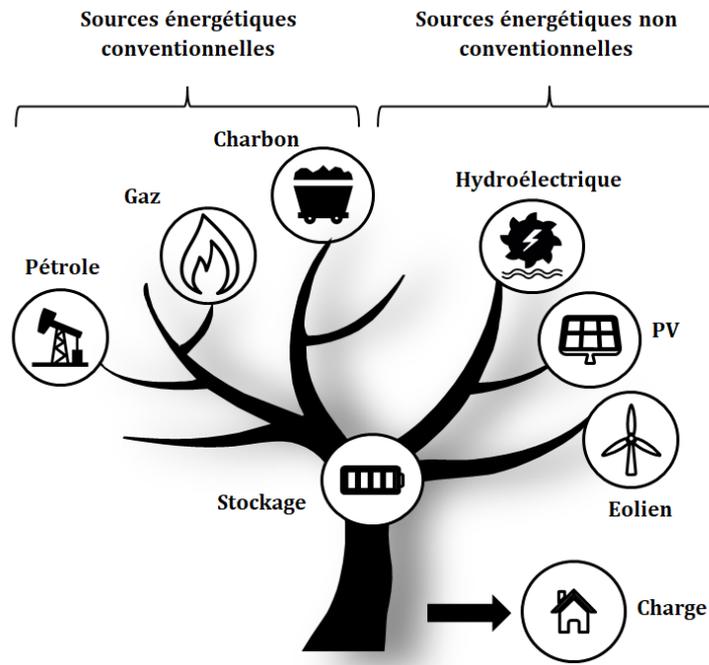


Figure 1. 3: SEH à base de ressources conventionnelles/non conventionnelles [5].

1.3.1 Les ressources d'énergies

1.3.1.1 L'énergie solaire

Le soleil est la principale source d'énergie nécessaire à la vie à la surface de la terre et est responsable de la création du cycle de l'eau, de la formation du vent et de l'énergie thermique à la surface de la terre, en plus d'autres sources renouvelables. L'énergie solaire est actuellement utilisée dans plusieurs domaines, chauffage de l'eau, chauffage des bâtiments, cuisson des aliments, production d'électricité et pompage de l'eau dans les régions isolées. L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées en raison de la disponibilité quotidienne des rayons solaires pendant la journée [1].

1.3.1.2 L'énergie éolienne

C'est l'énergie résultant de la répartition inégale de la chaleur solaire entre les pôles nord et sud et la ceinture équatoriale, qui entraîne une différence dans le réchauffement des masses d'air dans l'atmosphère. La vitesse et la direction du vent sont également affectées par le mouvement de la rotation de la Terre et la nature du terrain. L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes énergies utilisées par l'homme dans divers domaines :

- Transport (bateaux à voile avant 3000 ans).
- Moudre les grains (Moulin à vent vers le milieu du 19ème siècle).
- Pompage d'eau (9ème siècle) [1].

1.3.1.3 L'énergie fossile

L'énergie fossile utilise des combustibles fossiles extraits de divers matériaux tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, qui sont extraits du sol et brûlent avec de l'oxygène pour produire de la chaleur jusqu'à ce qu'elle soit exploitée dans plusieurs domaines [1].

1.3.2 Les composants de systèmes énergétiques hybrides

Le choix des composants des différents systèmes énergétiques hybrides dépend de la disponibilité des ressources et le cahier de charge de projet

1.3.2.1 Générateur photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque est un capteur qui transforme l'énergie lumineuse en électricité. 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. Il a été découvert par Antoine Becquerel en 1839. Il est basé sur le même principe des semi-conducteurs, les photons libèrent les électrons pour créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule ce qui génèrent un courant électrique continue.

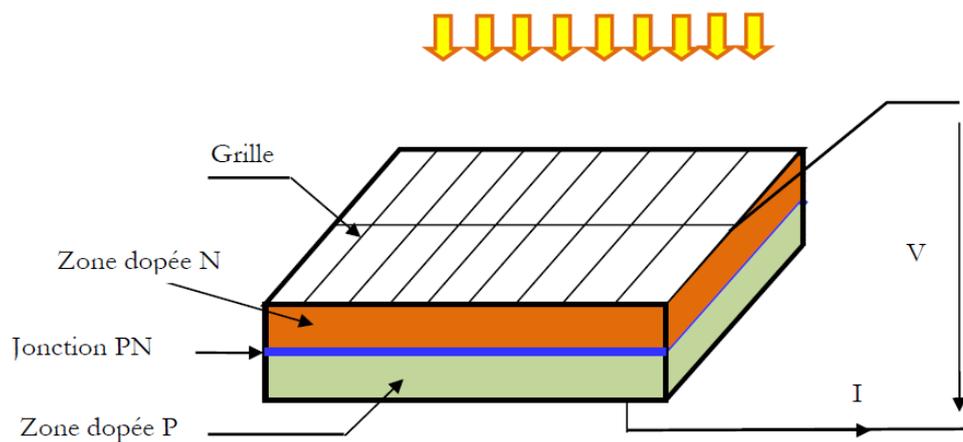


Figure 1. 4: le principe de la photovoltaïque [6]

Il existe plusieurs technologies des cellules photovoltaïques :

a- Silicium monocristallin

La cellule est fabriquée par un seul cristal de silicium, a un bon rendement, l'aspect de ces cellules est uniforme et couleur presque noir. Elle est applicable dans tous les domaines (les sites isolés, les appareils de puissance moyenne et faible, les toits et façades ...). La durée de vie de cette technologie est comprise entre 20 et 30 ans [7].

b- Silicium poly (ou multi-) cristallin

La cellule est fabriquée par plusieurs cristaux de silicium. Cette technologie est moins performante et moins chère par rapport à monocristalline. L'aspect de ces cellules est non uniforme et couleur bleu foncé et a même durée de vie que monocristalline [7].

c- Silicium amorphe

La cellule est fabriquée à partir de silicium en couche très mince. Cette technologie est moins efficace que les deux précédentes, mais elle peut fonctionner aussi bien en éclairage extérieur qu'en intérieur. On le trouve dans les montres et les calculatrices et vitrées semi-transparentes...etc [7].

d- Arséniure de gallium (GaAs)

Cette technologie est très chère et appliquée dans les satellites et les systèmes à concentration à cause du rendement très grand de 25-40 % [7].

e- Tellurure de cadmium (CdTe)

Il est considéré comme le meilleur dans la technologie du couches minces (3^{ème} génération) et le prix de fabrication est en baisse, mais cette technologie souffre d'un manque de matières premières (le Tellurure est un élément rare) et peut être interdite dans certains pays (le danger de cadmium à l'environnement). Le tableau 1.2 illustre les différentes technologies des cellules [7].

f- La technologie bifaciale

La première apparition de la technologie des panneaux bifaciaux remonte à 1954, et elle a connu un grand développement. Les panneaux bifaciaux sont capables de convertir le rayonnement en énergie électrique à l'avant et à l'arrière suivant la figure I.8:

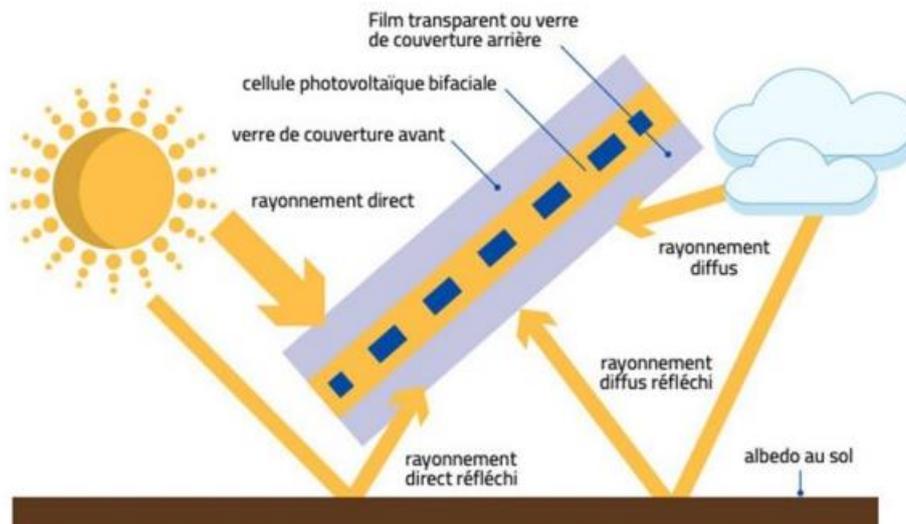


Figure 1. 5:Principe de fonctionnement du panneau solaire bifacial [5].

Cette face arrière ajoutée permet d'augmenter la production de 5% à 30% par rapport aux panneaux traditionnels d'après la réflectance au sol comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 1. 1: Impact de la réflectance au sol [8]

| La surface | ALBEDO | Gain de rendement attendu |
|----------------------------------|--------|---------------------------|
| L'eau | 5-8% | 4-6% |
| Sol nu | 10-20% | 6-8% |
| Prairie verte, Gravier | 15-25% | 7-9% |
| Sol en béton /Gravier blanc | 25-35% | 8-10% |
| Sable sec / dunaire | 35-45% | 10-15% |
| Toit réfléchissant : Revêtements | 80-90% | 23-25% |
| Neige fraîche | 80-95% | 25-30% |

g- La technologie demi-cellule (Half cut-cell)

Les panneaux de cette technologie coupent de moitié le courant interne du panneau. Ainsi, ils réduisent les pertes de résistance afin d'améliorer les performances. Comme montre la figure ci-dosse [8] :

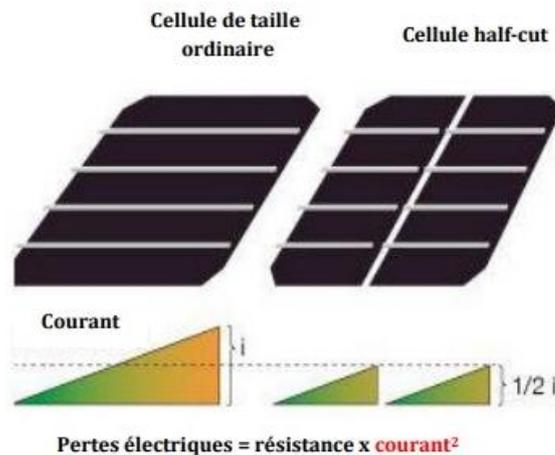


Figure 1. 6: Comparaison des pertes joules entre une demi-cellule et une cellule complète [5].

Une autre caractéristique des demi-cellules est la plus faible probabilité de fissures causées par des contraintes mécaniques en raison de la plus petite surface par rapport à la cellule entière. Par conséquent, la probabilité d'apparition de points chauds diminue également. En atteignant des valeurs de puissance inférieures, l'espacement obligatoire entre la moitié des cellules est inférieur à l'espacement des cellules pleines.

Les modules demi-cellule utilisent généralement des connexions série parallèle série (SPS), comme illustré à la figure ci-dessous. Ce type de connexion permet aux modules demi-cellule d'avoir une meilleure réponse à l'ombrage, car une moitié du module n'est pas affectée par l'autre. De plus, le logiciel de contact SPS permet de maintenir des niveaux de tension et de courant similaires aux unités conventionnelles [8].

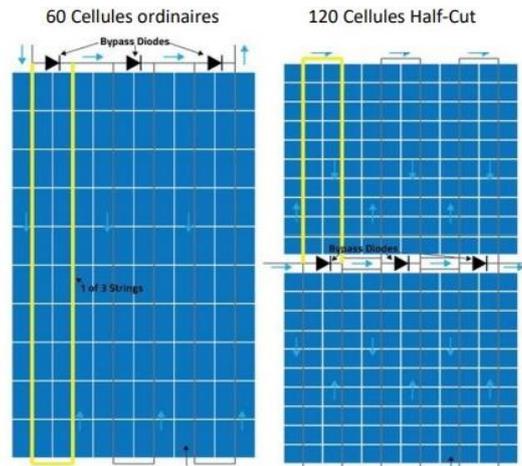


Figure 1. 7: Panneau standard à 60 cellules vs 120 cellules demi-coupées [8].

h- La technologie PERC (Passivated Emitter Rear Cell)

Les cellules de silicium cristallin n'absorbent pas tout le spectre de la lumière visible du soleil qui atteint la surface du panneau. Certaines de ces ondes peuvent traverser les couches de silicium jusqu'à ce qu'elles atteignent l'arrière du métal, ce qui provoque un gaspillage d'énergie. Afin de résoudre ce problème, les cellules PERC sont encapsulées entre silicium et aluminium à la face arrière est à travers une couche diélectrique qui empêche le gaspillage d'énergie et en réfléchissant le rayonnement. Ce processus permet aux couches de silicium d'absorber certaines longueurs d'onde qui ne seraient pas perdues, comme le montre la figure 1.8 [8] :

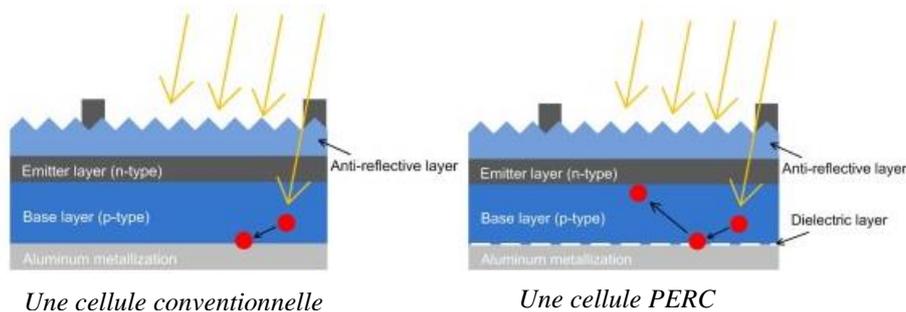


Figure 1. 8: Structure de la cellule [9]

Cette technologie fonctionne mieux dans des conditions de faible rayonnement et de faibles coefficients de température et actuellement les cellules PERC ont des rendements supérieurs à 22,5 % si elles sont monocristallines et 21 % si elles sont polycristallines [8].

i- Les cellules multi-busbars

Les cellules solaires au silicium sont métallisées avec de fines bandes rectangulaires imprimées sur les deux côtés de la cellule PV. Ils sont connus par jeux de barres qui sert à conduire le courant continu généré par la cellule photovoltaïque, les cellules multi-busbars ont plusieurs éléments :

- Les busbars des cellules solaires sont généralement fabriqués en cuivre recouverts par l'argent afin d'éviter l'oxydation et d'augmenter la conductivité du courant.
- Les doigts de cellules solaires sont imprimés via la technologie de sérigraphie. Ils sont placés perpendiculairement par rapport aux busbars afin qu'ils livrent le courant généré par les cellules [8].

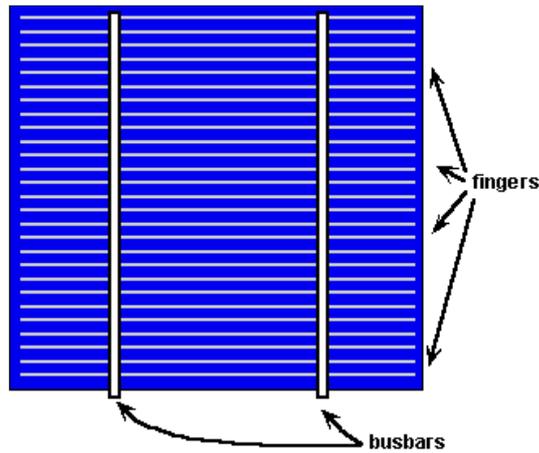


Figure 1. 9: Cellule busbar [5].

- L'onglet est généralement construit avec un fil de cuivre rond, il est soudé sur le jeu de barres des cellules photovoltaïques afin qu'il connecte les cellules individuellement en série pour avoir une tension appropriée.
- Fils de bus est des groupes de chaînes de cellules connecté aux onglets liés en parallèle pour augmenter le courant de module photovoltaïque. Les éléments doivent respecter les dimensions afin qu'ils supportent le courant (plus de surface donne moins de résistivité) [8].

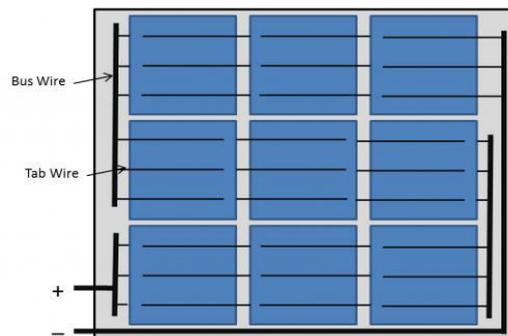


Figure 1. 10: Connexion des fils au cœur de la cellule [5].

Afin d'améliorer l'efficacité et la fiabilité et de réduire le coût du matériau utilisé (pâte d'argent), il doit y avoir un équilibre entre les pertes de résistance du maillage largement espacé et la réflexion du revêtement de surface supérieure. Cette technologie protège le panneau solaire de l'effet d'ombre et répartit uniformément les contraintes mécaniques pour réduire les risques de point chaud.

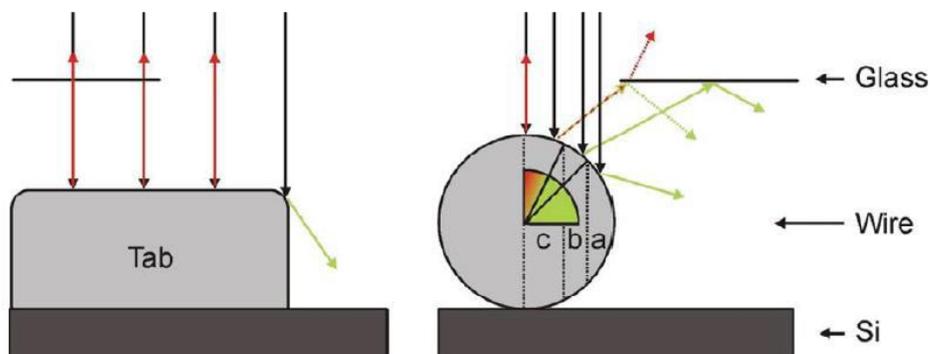


Figure 1. 11: Rayons descendant sur un onglet de busbars (à gauche) et sur un fil rond (à droite) [5].

La figure ci-dessus montre les différents types Rayons descendant sur un onglet de busbars et sur un fil rond, pour le conducteur rond on a trois zones d'importances, ou dans la région (a) le faisceau est directement réfléchi sur la surface de la cellule et la partie ombrée est réduite à 70,1% de la zone réel. Pour la zone (b), le conducteur réfléchi tous les rayons absorbés sur le verre de module photovoltaïque en réduisant la zone d'ombrage par 35.7%. Et finalement pour la zone (c), le conducteur réfléchi sur le verre par contre dans ce cas l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réflexion totale. Donc le conducteur rond diminue la zone d'ombre effective du fil et peut conduit à des courants de court-circuit plus élevés [5].

I.3.2.2 Générateur éolien

Les générateurs éoliens ont été inventés en 1891 par le danois POUL La Cour. La vitesse du vent fait tourner les pales qui génèrent une énergie mécanique qui sera transformée en électricité. Le prix de la production d'énergie par les éoliennes est devenu compétitif par rapport aux sources traditionnelles et cela est dû au développement des matériaux utilisé dans la conception des éoliennes.

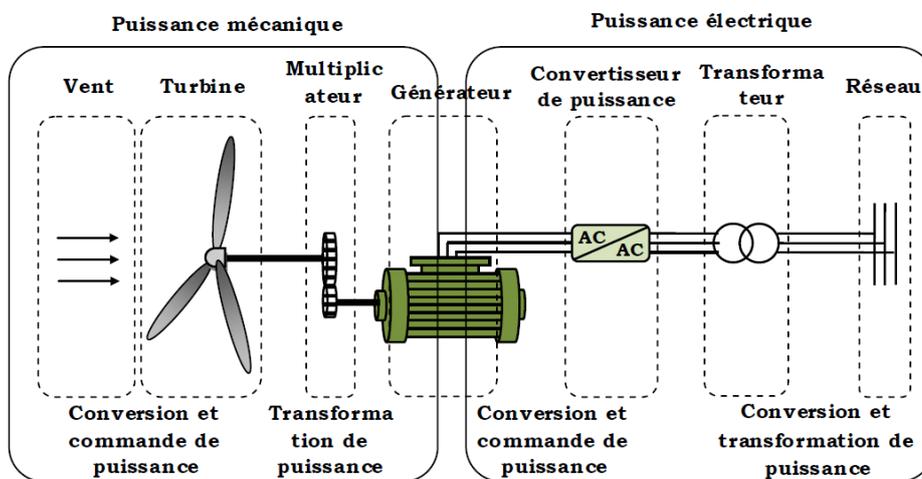


Figure 1. 12: Principaux organes du système de conversion éolien [2].

On peut classer les aérogénérateurs selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice en deux grandes catégories :

- **Les turbines éoliennes à axe horizontal**

Ces aérogénérateurs sont les plus répandus qui disposent d'un système de contrôle permettant d'orienter le rotor face au vent. Ils sont basés sur les moulins à vent et caractérisés par leur nombre des pales. Généralement la turbine éolienne à axe horizontal la plus utilisée est tripale, d'après les études trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, coût et vitesse de rotation du capteur de vent. Contrairement aux éoliennes à axe vertical, les éoliennes à axe horizontal sont moins soumises aux contraintes mécaniques et ont un rendement aérodynamique plus important [2].

- **Les turbines éoliennes à axe vertical**

Ce type n'est pas puissant par rapport les éolienne à axe horizontale mais il offre beaucoup d'avantage notamment, les aérogénérateurs peut être installés au sol et cela nous élargit les possibilités de les mettre dans des endroits où ce n'est pas possible pour l'autre type. D'autre part, ils ne sont pas besoin d'un système d'orientation puisque le vent peut faire tourner les pales dans toutes les directions [2].

Il excite plusieurs technologies des générateurs éoliennes :

a- Eolienne Wind Belt

L'éolienne Wind Belt a été créée par Frayne en 2004 et étudiée par plusieurs chercheurs. Elle convertit les vibrations en une énergie électrique par le principe des trois mécanismes (méthodes électromagnétiques, piézoélectriques et électrostatiques). En fait elle est basée sur l'effet de battement aéroélectrique qui capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en vibrations qui vont autoalimenter la structure élastique de l'éolienne Wind Belt. Qui crée un champ magnétique et produit un courant électrique. Ils sont utilisés pour les faibles vitesses [5].

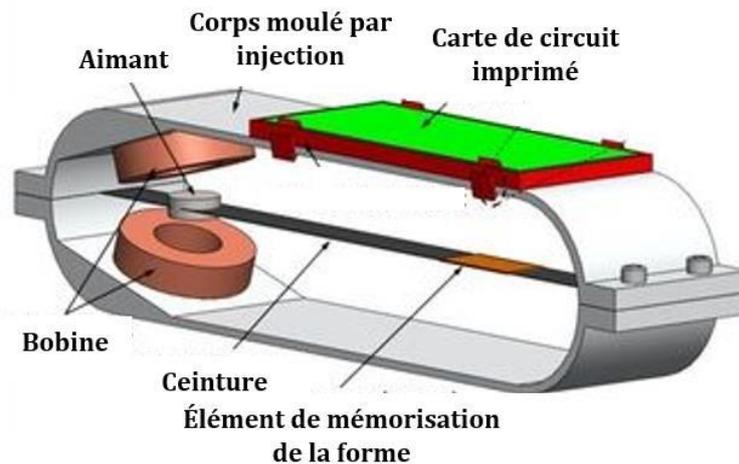


Figure 1. 13: Les composants de l'éolienne Wind Belt [5].

b- Eolienne volante

L'éolienne sans pales est un générateur d'électricité qui n'a pas la même structure que l'éolienne classique, ils volent librement dans l'air ou sont reliés au sol par un filin. Ils ont le même principe de fonctionnement que les autres systèmes éoliens aéroportés, tel que ils doivent maintenir une force importante contre le mouvement d'air pour créer l'énergie, c'est possible de les relier à une station terrestre fixe ou à un objet mobile terrestre, un véhicule par exemple. Les trois principaux avantages des éoliennes aéroportées sont :

- Ils fonctionnent aux altitudes plus élevées que les éoliennes classiques.
- Les vents en haute altitude sont plus élevés que ceux au sol ce qui nous produit plus d'énergie.
- Le coût d'investissement par unité est plus faible [5].



Figure 1. 14: Eolienne volante (Aéroportée) [5].

c- Éolienne sans pales

Les éoliennes sans pales produisent de l'électricité à partir du vent. Contrairement aux autres éoliennes, ce type ne se compose pas de pales. Son coût de maintenance est faible par rapport aux éoliennes traditionnelles du fait de l'absence de nombreuses pièces mécaniques. Il se caractérise également par sa légèreté et son silence et est considéré comme sans danger pour les oiseaux. Actuellement, leur capacité est très faible, ce qui est un obstacle majeur, mais il est possible d'utiliser plusieurs générateurs sur une surface puisque ils ne prennent pas beaucoup de place [5].



Figure 1. 15: éolienne sans pales [5].

1.3.2.3 Le groupe électrogène

Un groupe électrogène est un moteur thermique qui actionne un alternateur afin de produire l'électricité selon nos besoins, ou on peut trouver plusieurs tailles de groupes électrogènes dans le marché, malgré qu'il est pratique et fiable dans les zones isolées où le fioul (l'essence, le gasoil, le gaz naturel, le GPL, les biocarburants et pour les plus puissants le fioul lourd) peut être stocké, contrairement au vent et au rayonnement solaire mais il est très polluant, c'est pour ça généralement il est utilisé comme un système d'appoint dans les cas d'urgences. Il est régulé à une tension de sortie de 230V avec une fréquence constante de 50Hz (en Europe) grâce à un dispositif centrifuge analogue au régulateur à boules de James Watt qui commande directement le carburateur ou la pompe d'injection [5].



Figure 1. 16: groupe électrogène [5].

Il en existe plusieurs types sur le marché, notamment :

a- Le groupe électrogène à diesel

Le générateur diesel est généralement utilisé pour les travaux de construction et l'utilisation intensive car il produit plusieurs milliers de kilowatts, Il est déconseillé pour l'utilisation domestique dû à son bruit très élevé

b- Le groupe électrogène à essence

Le générateur à essence est le plus couramment utilisé en raison de son niveau de bruit inférieur à celui des générateurs diesel. Il s'active automatiquement suite à une coupure d'électricité

c- Le groupe électrogène insonorisé

Le générateur insonorisé génère un bruit très faible, et il est connu pour sa légèreté contrairement aux autres types, mais sa puissance ne dépasse généralement pas 2 kilowatts.

1.3.2.4 Dispositif de stockage

Les ressources naturels ne sont pas disponibles pendant toute la journée c'est pour cela il est meilleur d'utiliser un système de stockage afin qu'ils nous assurent une continuité d'électricité. Il existe plusieurs méthodes qui servent le même objectif, par exemple :

- Chimique (batteries)
- Mécanique (volant d'inertie)
- Hydraulique (STEP)

La méthode la plus couramment utilisée est les batteries car d'autres méthodes nécessitent des conditions spécifiques, par contre, les accumulateurs prennent moins de place et n'ont pas besoin d'énormes structures d'eau.

En 1801 la pile Volta non-rechargeable a été créée, ensuite les batteries rechargeables (les accumulateurs au Pb 1859, Ni-Cd et dérivé 1900 et Ni-métal-hydrure 1975) puis les systèmes au lithium (Li-métal 1973, Li-Ion 1978 et Li-polymère 1979) et maintenant on a les supra-capacités. Le mouvement d'ensemble des électrons qui se déplace à partir de l'électrode positive (cathode) vers l'électrode négative (anode) en passant

par un fil de métal (conducteur) crée un courant électrique afin d'alimenter un récepteur dans ce cas la batterie joue le rôle d'une source de tension (batterie se décharge), ce mouvement est une réaction entre les électrodes et la solution électrolytique qui sert à assurer la conduction ionique. Le montage des batteries est selon nos besoins (montage en série pour augmenter la tension et montage en parallèle pour augmenter le courant). Et généralement dans ce type de projet on utilise les batteries Li-Ion [5].

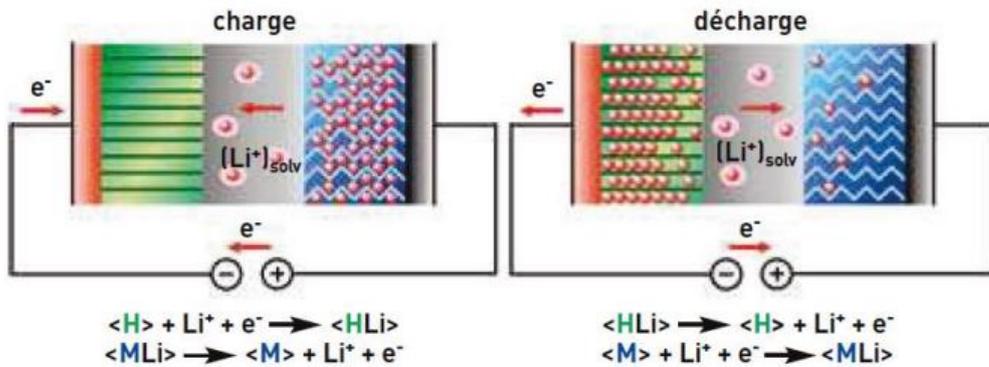


Figure 1. 17: principe de fonctionnement d'une batterie Li-Ion [5].

1.3.2.5 Les convertisseurs

Ce sont des dispositifs permettant de convertir le courant électrique de continu en alternatif et vice versa. Ils sont également utilisés pour réguler la charge des batteries dans les systèmes d'énergie hybrides, y compris :

- Les hacheurs (CC/CC).
- Les onduleurs (CC/CA).
- Les redresseurs (CA/CC).
- Les convertisseurs bidirectionnels de charge et décharge [5].

1.3.2.6 Les systèmes de supervision

La supervision est un algorithme qui assure la gestion des flux d'énergie entre différentes sources générateur ou récepteur par exemple dans les systèmes de puissance photovoltaïque éolienne avec batterie en cite isolée l'algorithme détecte quand les algorithmes de maximisation de puissance doivent être dégradés si les batteries sont pleines et quand le consommateur doit être déconnecté si elles sont vides [5].

1.3.3 Les avantages d'un système énergétique hybride

- le cout d'énergie
- la fiabilité.
- la qualité de l'énergie.
- l'accès aux zones isolées.
- l'efficacité énergétique.
- l'atténuation du changement climatique [5].

1.4 Architectures des systèmes énergétiques hybrides

Il existe trois types d'architectures des SEH soit par bus CC ou bus AC ou par les deux bus AC et CC.

1.4.1 Architecture en bus continu (CC)

Les systèmes d'énergie hybrides (système photovoltaïque et système de stockage) sont directement connectés au bus CC, et dans le cas d'un générateur diesel, nous avons besoin d'un redresseur pour se connecter au bus CC, et ce dernier alimente la charge CC et la charge AC à travers l'onduleur, qui fournit une tension alternative d'amplitude et de fréquence fixe comme montre la figure 1.18 [5].

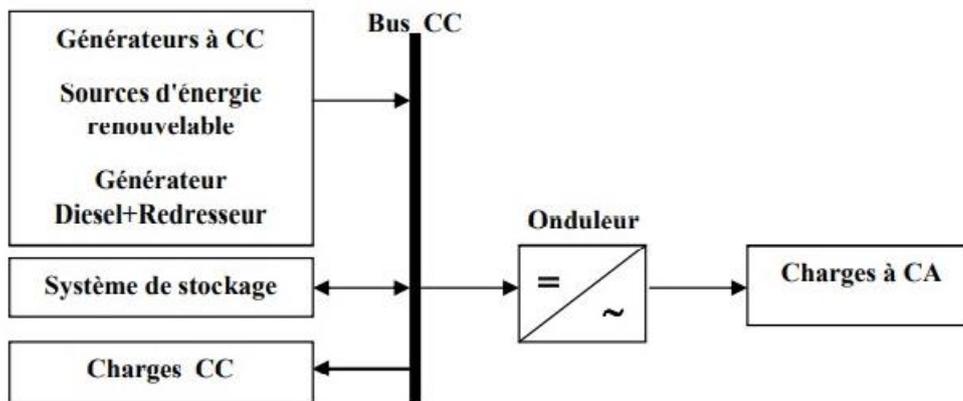


Figure 1. 18: Architecture d'un SEH en bus CC [5].

Les 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 [5].

Les inconvénients

- L'onduleur de la charge ne peut pas fonctionner 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 [5].

1.4.2 Architecture en bus alternatif (CA)

Les systèmes d'énergie hybrides (système photovoltaïque et système de stockage) sont connectés au bus AC par l'onduleur, et dans le cas d'un générateur diesel ou d'une éolienne, ils sont directement connectés au bus AC, et ce dernier alimente la charge AC et la charge CC via le redresseur comme montre la figure 1.19 [5].

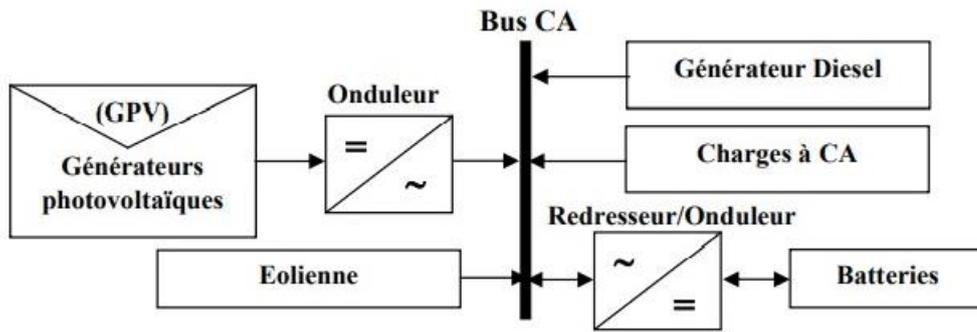


Figure 1. 19: Architecture d'un SEH en bus CA [5].

Les 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 [4].

Les 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 [5].

1.4.3 Architecture en bus (CA/CC)

Dans cette architecture les sources d'énergies CC sont connectées au bus CC et les sources d'énergies CA sont connectées au bus CA et les deux bus sont connectés à un convertisseur bidirectionnel qui agit comme un onduleur ou redresseur comme montre la figure 1.20

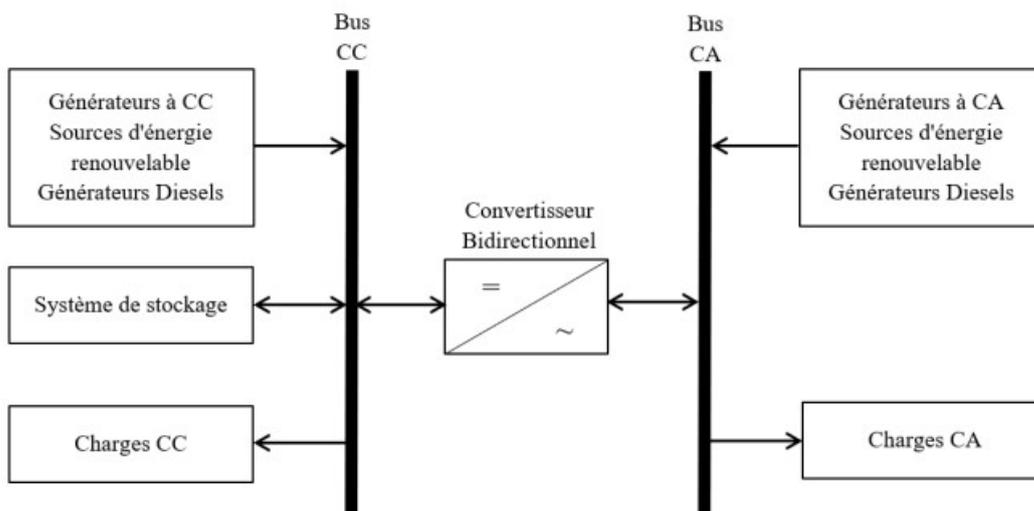


Figure 1. 20: Architecture des (SEH) à bus à CC/CA [5].

Les 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 [5].

Les inconvénients

- _ Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système.
- _ Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- _ Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié.
- _ Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur).
- _ Le bus continu est plus difficile à contrôler [5].

1.5 Les configurations des systèmes énergétiques hybrides fréquentes

Les systèmes d'énergie solaire hybrides sont des systèmes d'énergie hybride qui combinent l'énergie solaire du système photovoltaïque avec une autre source pour générer de l'énergie électrique telle que l'énergie éolienne. Ces deux sources sont les plus courantes utilisées dans les systèmes d'énergie hybride en raison de leur évolution.

Un générateur diesel ou un système de stockage peuvent être ajoutés à l'alimentation pour éviter le problème de l'intermittence [5].

1.5.1 PV-Batterie

On peut installer un générateur photovoltaïque avec une batterie (dispositif de stockage) pour assurer la disponibilité d'électricité durant la nuit ou dans le temps nuageux [5].

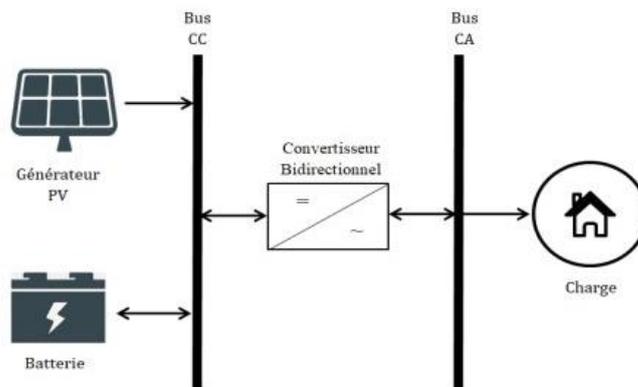


Figure 1. 21: SEH PV/Batterie [5].

1.5.2 Eolienne – Batterie

Le lien entre générateur éolienne et la batterie peut être pour deux raisons, soit pour stocker l'énergie pendant un long temps et alimenter la charge lorsque la vitesse du vent est faible [5].

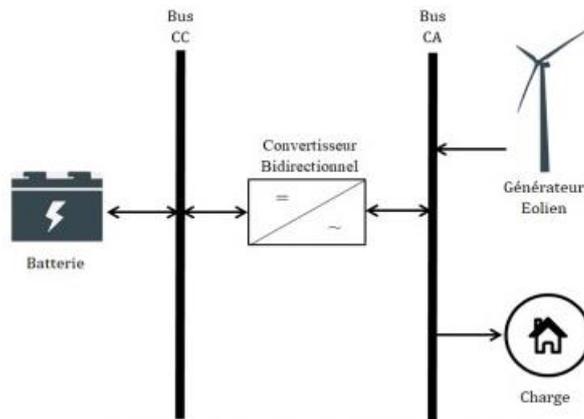


Figure 1. 22: SEH Eolien/Batterie [5].

1.5.3 PV-Eolienne-Batterie

Cette configuration n'est pas largement utilisée sans batterie, car elle ne garantit pas que l'alimentation est disponible à tout moment, comme indiqué la figure 1.23, il faut donc ajouter un système de stockage d'énergie comme sur la figure 1.24 [5].

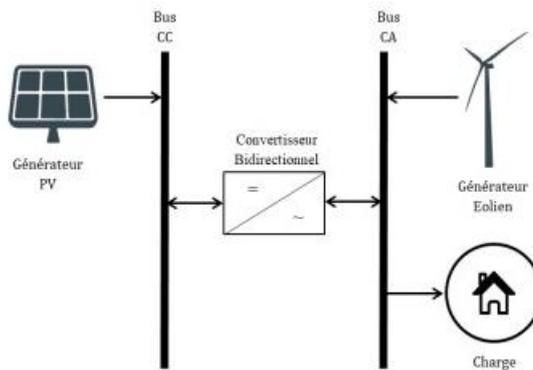


Figure 1. 23: SEH Eolien/PV sans système de stockage [5].

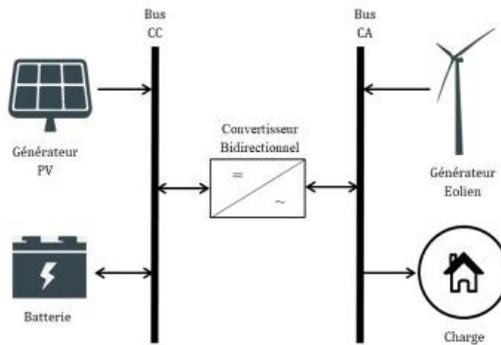


Figure 1. 24: SEH Eolien/PV avec système de stockage [5].

1.5.4 PV-Eolienne-Générateur diesel

Ce système convient aux zones ensoleillées avec des vents violents, et ce système peut être isolé du réseau [5].

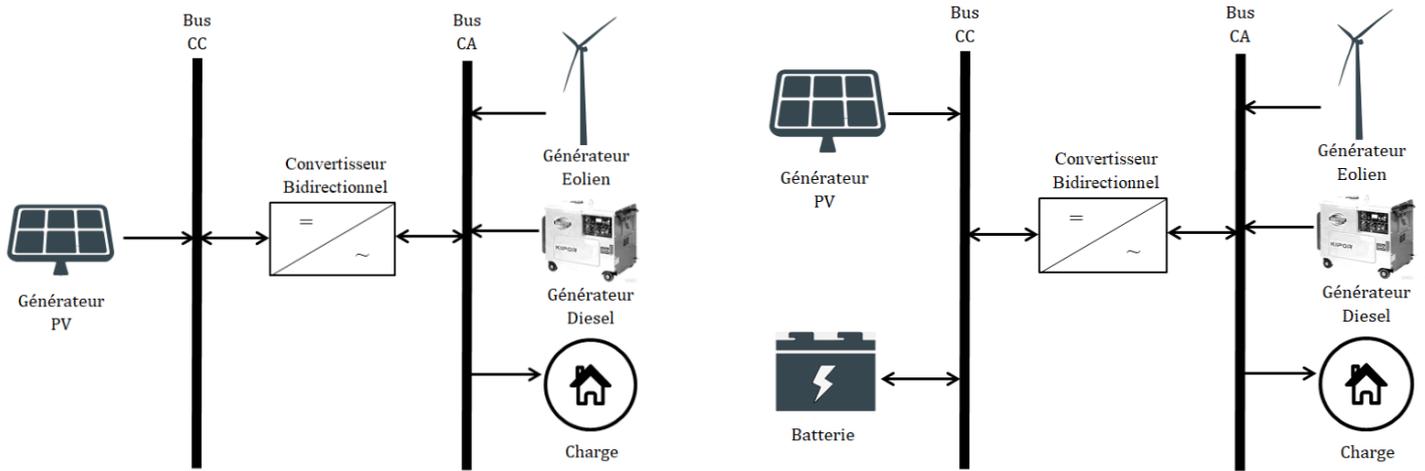


Figure 1. 25: SEH PV-Eolienne-Générateur diesel [5].

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu le potentiel énergétique en Algérie on concentrant sur l'énergie solaire et l'énergie éolienne puis on a cité quelque technologie pour capter ces deux ressources. Ensuite nous avons mentionné les architectures possibles avec quelque configuration des systèmes énergétique hybrides.

Chapitre 2 :

Dimensionnement et

modélisation

2.1 Introduction

L'utilisation des sources d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque et éolienne, réduit les émissions des gazes toxiques dans l'atmosphère. L'hybridation entre eux augmente leur efficacité et leur rendement, et l'ajout d'un bon système de stockage contribue à éliminer le problème de l'intermittence.

L'un des plus grands obstacles des SEH est leur prix élevé, et donc il faut bien dimensionner la production et la charge de l'installation et utiliser les meilleures méthodes d'optimisation de SEH pour éviter des dépenses supplémentaires.

Dans ce chapitre, nous verrons les différentes méthodes d'optimisation les plus couramment utilisées pour dimensionner un SEH et nous modéliserons également les composants d'un SEH constitué d'une source d'énergie PV et éolienne avec un système de stockage (les batteries).

2.2 Métriques de l'énergie hybride

Il existe de nombreux indicateurs de performance importants pour la conception de systèmes d'énergie hybrides renouvelable, qui peuvent contribuer à l'augmentation de la durée de vie du système et à améliorer leur efficacité tout en réduisant le coût du système. Il contribue également à la sélection optimale des composants de SEHR et l'un des indicateurs les plus importants est le facteur de coût dont l'attribution représente 84%, ainsi que le facteur Dimensionnement et composition, dont l'attribution représente 46%, et d'autres indicateurs sont présentés dans la Figure 2.1 [5].

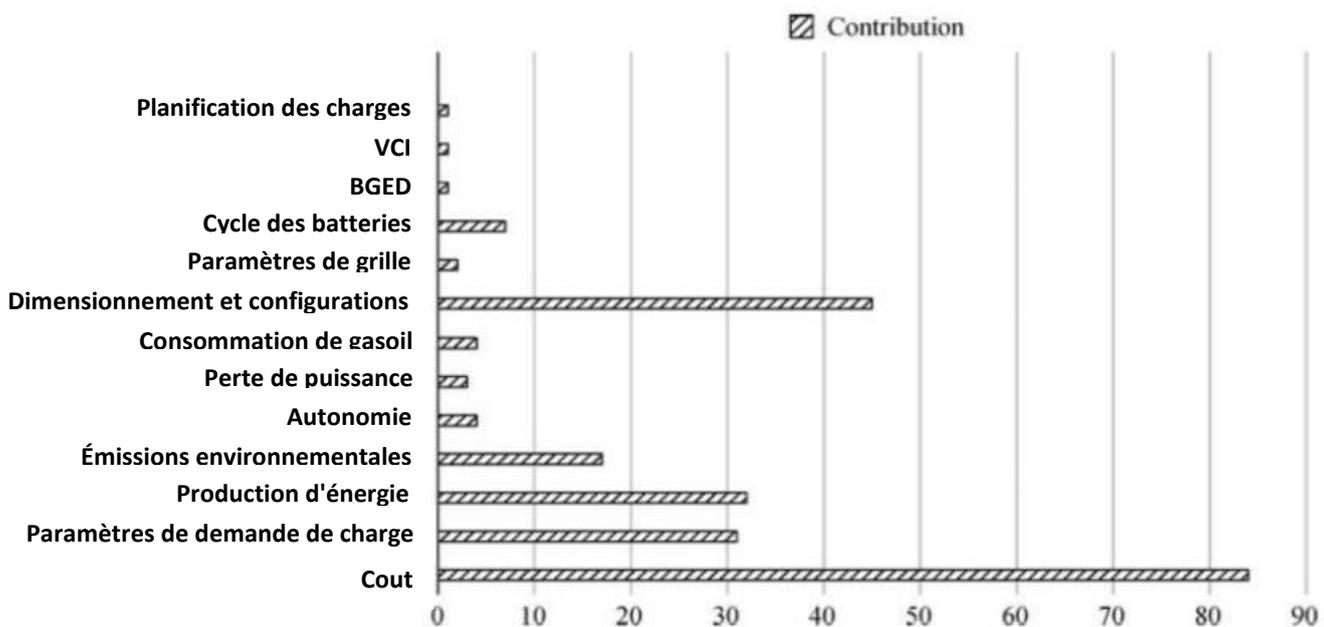


Figure 2. 1: Indicateurs de performance pour les SEH [5].

2.3 Les méthodes de Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

Il existe Plusieurs méthodologies de dimensionnement utilisées dans concevoir les SEH comme signifie le diagramme de la figure 2.2 [5].

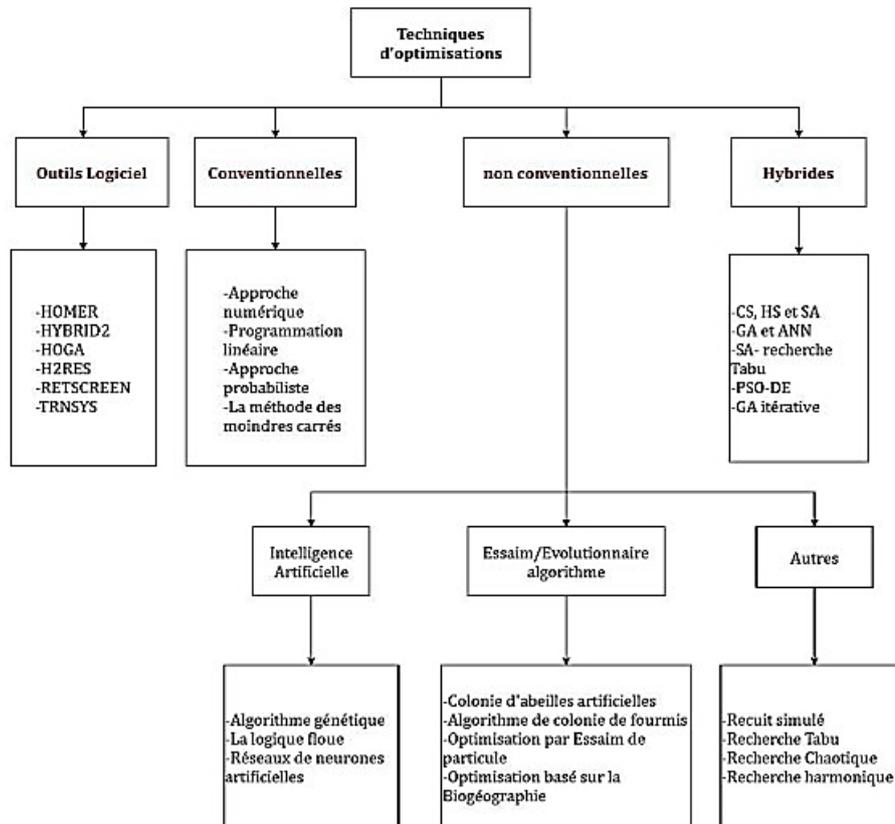


Figure 2. 2: Diagramme regroupant différentes méthodes d'optimisation [5].

2.3.1 Outils logiciels

Dans les techniques d'optimisations outils logiciel et parmi les logiciels le plus utilisés

2.3.1.1 HOMER :(Hybrid optimization method for electric renewable)

Le modèle d'optimisation hybride pour les énergies renouvelables électriques (HOMER) a été développé par le National Renewable Energy Laboratory et utilise une simulation pour obtenir la configuration optimale. Ce simulateur utilise un pas de temps horaire et des données environnementales pour fournir une optimisation en tenant compte des contraintes et des variables de la source d'énergie renouvelable. Il ne permet pas à l'utilisateur de sélectionner un composant approprié pour un système [10].

2.3.1.2 HOGA :(Hybrid optimization by genetic algorithm)

Il a été développé par le Département de génie électrique de l'Université de Saragosse (Espagne). C'est un programme d'optimisation pour les systèmes hybrides qui utilise des algorithmes génétiques. Il propose un intervalle de 1 h dans une simulation où tous les paramètres restent constants [10].

2.3.1.3 HYBRID2

HYBRID2 a été développé par le "Renewable Energy Research Laboratory" de l'Université du Massachusetts. Il peut atteindre une grande précision dans la simulation en proposant un intervalle de temps allant de 10 min à 1 h. Le RERL recommande de commencer à optimiser le système hybride avec HOMER et d'améliorer la conception en utilisant HYBRID2 [10]

2.3.1.4 TRNSYS

Programme de simulation du système d'énergie transitoire (en anglais Transient Energy System Simulation Program) Il s'agit d'un logiciel de simulation pour les systèmes énergétiques, développé à Fortran en 1975 par l'Université du Wisconsin et l'Université du Colorado (USA). Il a été initialement développé pour simuler des systèmes thermiques, alors qu'il est devenu un simulateur de système hybride, y compris photovoltaïque, solaire, thermique et d'autres systèmes. La bibliothèque standard de TRNSYS comprend de nombreux composants couramment utilisés dans les systèmes d'énergie thermique et électrique renouvelable. La simulation est réalisée avec une grande précision, ce qui permet de visualiser les graphiques avec précision. Cependant, il ne permet pas la réalisation d'optimisations. Il n'est pas gratuit [10].

2.3.2 Techniques conventionnelles

Différentes méthodes conventionnelles sont appliquées pour obtenir les configurations optimales des systèmes hybrides.

2.3.2.1 Programmation linéaire

Modèle de programmation linéaire (Linear programming model : LPM)

Avantage

L'optimisation des problèmes linéaires est adaptée à l'analyse de la fiabilité des indices de probabilité et les contraintes économiques.

Inconvénient

Le non-fonctionnement de l'une des sources d'énergie renouvelables peut avoir un impact considérable sur la capacité du système global à fournir de l'énergie [10].

2.3.2.2 Approche probabilité

Les approches probabilistes pour le dimensionnement du système hybride étudient l'effet du rayonnement solaire et de la fluctuation de la vitesse du vent pour la conception du système. Dans cette approche, des modèles appropriés pour la production de ressources et/ou la demande sont développés et finalement un modèle de risque est créé par une combinaison de ces modèles. Cependant, cette technique d'optimisation ne peut pas caractériser la performance dynamique changeante du système intégré/hybride [10].

2.3.2.3 La méthode des moindres carrés

En statistique, la méthode des moindres carrés ordinaires permet d'estimer les paramètres inconnus d'un modèle de régression linéaire. A la base cette méthode permet de minimiser la somme des carrés des différences entre la variable dépendante observée (valeurs de la variable observée) dans l'ensemble de données donné et celles prédites par la fonction linéaire de la variable indépendante. Ainsi, la méthode des moindres carrés fournit une estimation sans biais de la moyenne à variance minimale lorsque les erreurs ont des variances finies.

Pour un système hybride, nous utilisons la méthode des moindres carrés, pour minimiser la somme des carrés des écarts de la charge et de la puissance générée par les générateurs photovoltaïque et l'éolien [10].

2.3.3 Techniques d'optimisation non conventionnelles

Techniques d'optimisation non conventionnelles se compose des techniques d'intelligent artificielle comme :

2.3.3.1 Algorithme génétique (Genetic algorithm : GA)

L'algorithme génétique est un processus de recherche qui imite le processus de sélection naturelle telles que l'héritage, la mutation, la sélection et le croisement, et a été développé par John Holland dans les années 1960-1970. Des nombreux chercheurs ont utilisé l'application de l'GA pour la conception et l'exploitation optimales des systèmes énergétiques hybrides PV-éolien [10].

Avantage

- Elles peuvent résoudre des problèmes à solutions multiples, sont faciles à comprendre et peuvent être facilement transférés à des systèmes existants.
- Les techniques d'algorithme génétique en code réel sont basées sur le mécanisme de la sélection naturelle et de la génétique naturelle.

Inconvénient

- Elles dépendent fortement de la convergence vers des optima locaux en raison du processus d'intensification.
- Elles ne peuvent pas garantir un temps de réponse constant de l'optimisation etc.

2.3.3.2 Colonie de fourmi (Ant colony)

L'algorithme des colonies d'abeilles artificielles (Bee Colony Algorithm 'BCA' en anglais) est un algorithme d'optimisation basé sur le comportement de butinage intelligent d'un essaim d'abeilles, proposé par Karaboga et Basturk. Dans cette approche, la position d'une source de nourriture représente une solution possible pour le problème d'optimisation et la quantité de nectar d'une source de nourriture correspond à la qualité de la solution associée. Cet algorithme aide également à trouver la perte de puissance totale, le coût total de l'énergie électrique, les émissions totales produites par le système énergétique hybride, la minimisation du réseau et l'indice de stabilité de tension de la maximisation du système de distribution.

- a- Avantage : vitesse de convergence élevée
- b- Inconvénient : espace nécessaire pour la mémoire à long terme [10].

2.3.3.3 Algorithme de recherche d'harmonie (HSA)

La recherche harmonique (HSA : Harmony search algorithm en anglais) est un algorithme d'optimisation heuristique sans dérivation, à paramètres réels, employé pour l'optimisation, avec plusieurs techniques d'optimisation méta-heuristiques évolutionnistes. La HSA est l'une des techniques d'optimisation basée sur la population la plus récente qui peut être adoptée dans divers domaines d'applications techniques. Maleki et al. ont utilisé l'algorithme de la recherche d'harmonie (HS) pour le dimensionnement optimal d'un système PV rentable basé sur une pile à combustible et un système hybride PV-éolien-batterie [10].

2.3.4 Techniques d'optimisation hybride

La méthode la plus utilisée est la méthode de PSO (Particle Swarm Optimization) et autre méthode comme recherche de Tabu.

2.3.4.1 Optimisation par essaims de particules (Particle swarm optimization : PSO)

C'est un algorithme de recherche d'optimisation développé par Kennedy sur la base de recherches sur le comportement des oiseaux et des poissons. Une fois le problème est défini la fonction objective est introduite en tenant compte de la sensibilité des valeurs dans le processus d'essaimage de particules. L'utilisation de cette méthode dans le système hybride PV-éolien est récente et de nombreux travaux de recherche l'ont utilisé. Une technique stochastique basée sur la population PSO commence avec une population de solutions aléatoires (particules) et recherche l'optimum en actualisant les générations. Lee et

Cohen ont utilisé un algorithme PSO évolutionniste pour résoudre la capacité éolienne et photovoltaïque dans le but de maximiser le rapport bénéfice-coût. K. Kaviani et al. Ont optimisé un système de production hybride éolien-photovoltaïque-pile à combustible sur ses 20 ans de fonctionnement [10].

2.3.4.2 Recherche de recuit simulé (Simulated Annealing (SA)-Tabu search (TS))

Avantage

Les techniques méta-heuristiques peuvent améliorer la qualité et la convergence, au lieu des SA et TS individuels [10].

Inconvénient

Répétabilité des résultats d'optimisation obtenus avec la même condition initiale [10].

2.3.5 Méthode itérative/AG

Avantage

Les chromosomes ayant une valeur de justesse (fitness) plus élevée sont utilisés pour produire la génération suivante [10].

Inconvénient

Des solutions sous-optimales sont atteintes en raison du changement linéaire des variables de décision [10].

2.4 Les techniques et algorithmes les plus couramment utilisées dans les SEHR

Il existe plusieurs outils et méthodes afin d'optimiser les performances et l'efficacité des systèmes hybrides, on cite GA, PSO, SA et le logiciel le plus utilisé est HOMER mais dans notre étude on a utilisé la simulation sur MATLAB. La figure ci-dessous illustre la diversité des méthodes et algorithmes d'optimisation courants qui ont été utilisés pour la conception des SEHR [5].

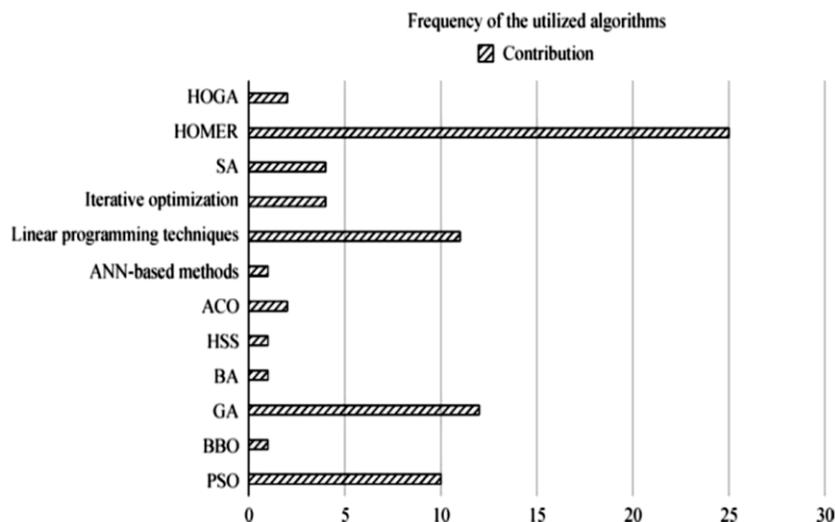


Figure 2. 3: Contribution des algorithmes et méthodes d'optimisation les plus communément utilisés [5].

2.5 Modélisation des composants du SEHR

2.5.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie des panneaux PV (kW) dépend du rayonnement solaire et de la température ambiante, comme montre dans l'équation [11]

$$P_{pv}(t) = N_{pv}\eta_{pv}P_{npv}\frac{G}{G_{ref}}[1 + K_t(T_c - T_{ref})] \quad (2.1)$$

Où : N_{pv} : est le nombre de panneaux PV.

η_{pv} : est le rendement de conversion.

P_{npv} : est la puissance nominale dans les conditions d'essai standard (STC).

G : est le rayonnement solaire (W/m^2).

G_{ref} : est le rayonnement solaire maximal ($1000 W/m^2$).

K_t : est égal à $-3.7 * 10^{-3}$ ($1/^\circ C$).

T_{ref} : est la température de référence ($25^\circ C$).

T_c : est la température de la cellule STC ($^\circ C$), telle que :

$$T_c = T_a + G \cdot \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (2.2)$$

T_a : est la température ambiante et (NOCT) est la température nominale de fonctionnement de la cellule.

2.5.2 Modélisation du générateur éolien

La puissance de sortie de la turbine éolienne est supposé qu'elle augmente linéairement avec la vitesse du vent du démarrage jusqu'elle attendre la vitesse nominale, ensuite elle se stabilise a une constante. Les équations caractéristiques suivantes ont été proposées pour la modélisation de l'éolienne [11] :

$$P_w = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_d \\ P_{w_n} \frac{V - V_d}{V_n - V_d} & \text{pour } V_d \leq V \leq V_n \\ P_{w_n} & \text{pour } V_n \leq V \leq V_c \\ 0 & \text{pour } V > V_c \end{cases} \quad (2.3)$$

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_{w_n} : La puissance nominale de l'éolienne
- P_w : La puissance fournie par l'éolienne

2.5.3 Modélisation du système de stockage

Le stockage du parc de batteries est dimensionné pour répondre à la demande de charge pendant la période d'indisponibilité de la source d'énergie renouvelable, communément appelée jours d'autonomie. Généralement, le nombre de jours d'autonomie est de 2 ou 3 jours.

Le dimensionnement de la batterie dépend des facteurs tels que la profondeur maximale de décharge (DOD_{max}), le facteur de correction de température (T_{cf}), l'autonomie de la batterie ou les jours de stockage (S_D), la tension du bus continu (V_B) et le rendement de la batterie (η_B).

La capacité totale du groupe de batteries qui doit être utilisée pour répondre à la charge est déterminée à l'aide de l'expression suivante [11] :

$$C_B = \frac{E_L \cdot N_{Sd}}{V_B \cdot DOD_{max} \cdot T_{cf} \cdot \eta_B} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} E_{pv}(t) = P_{pv}(t) \times \Delta t \\ E_w(t) = P_w(t) \times \Delta t \\ E_{ch}(t) = P_{ch}(t) \times \Delta t \end{cases} \quad (2.5)$$

En fonction de l'énergie produit par le générateur PV et la turbine éolienne et des besoins en puissance de charge, l'état de charge de la batterie peut être calculé à partir des équations suivantes :

La batterie en charge [12] :

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat}(t-1)(1-\sigma) + (E_{gen}(t) - E_{ch}(t)/\eta_{ond}) \times \eta_{cha} \quad (2.6)$$

La décharge de la batterie :

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat}(t-1)(1-\sigma) + (E_{ch}(t)/\eta_{ond} - E_{gen}(t)) \quad (2.7)$$

Où :

$SOC_{bat}(t)$: L'état de charge en (Wh) du banc de batterie à l'instant t .

$SOC_{bat}(t-1)$: l'état de charge en (Wh) du banc de batterie à l'instant $t-1$.

σ : le taux horaire de la charge spontanée.

E_{gen} : L'énergie produite par le générateur photovoltaïque et l'éolienne.

E_{pv} : L'énergie produite par le générateur photovoltaïque.

E_w : L'énergie produite par.

E_{ch} : L'énergie demandée par la charge.

$P_{pv}(t)$: La puissance produite par le générateur PV à l'instant t .

$P_w(t)$: la puissance produite par l'éolienne à l'instant t .

$P_{ch}(t)$: la puissance demandée par la charge à l'instant t .

Δt : le pas de simulation ($\Delta t = 1h$).

η_{ond} : le rendement de l'onduleur.

η_{cha} : le rendement de chargement des batteries.

- **Limites de l'état de chargement des batteries :**

La quantité chargée du parc de batteries est soumise aux deux contraintes suivantes [12] :

$$SOC_{bat_{min}} \leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat_{max}}$$

Avec :

SOC_{bat_min} et SOC_{bat_max} sont les états de charge limites des batteries de stockage. En outre, nous considérons SOC_{bat_max} comme étant la capacité nominale du système de stockage C_B , cette dernière est reliée à la limite inférieure de l'état de charge par la relation suivante :

$$SOC_{bat_min} = (1 - DOD) \times C_B \quad (2.8)$$

Où : DOD (%) représente la profondeur de décharge des batteries.

2.6 DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME D'ENERGIE HYBRIDE

Dans notre étude technico-économique nous allons choisir la méthode DPSP (Deficiency of Power Supply Probability) avec l'analyse économique pour déterminer la configuration optimale de SEH.

2.6.1 Description de la méthode DPSP

Dans le fonctionnement du système énergétique hybride on a deux phases [12]:

Première phase :

Dans le cas où la puissance produite par l'éolienne et le générateur PV est supérieure à la puissance demandée par la charge ($P_{ch} < P_w + P_{PV}$), cette énergie excédentaire, est dirigée vers les batteries via des convertisseurs statiques. Le nouvel état de charge des batteries est calculé, si celui-ci dépasse l'état maximum SOC_{bat_max} , l'énergie excédentaire est dirigée vers les charges auxiliaires.

Deuxième phase :

Dans le cas où la puissance produite est inférieure à la puissance demandée par la charge ($P_{ch} > P_w + P_{PV}$) les batteries se déchargent à travers l'onduleur après le calcul de leur état de charge avec condition que l'état de charge minimum SOC_{bat_min} ne soit pas atteint ($SOC_{bat} > SOC_{bat_min}$). Si l'énergie des batteries ne suffit pas à satisfaire la puissance demandée par la charge au temps t , le système de contrôle déconnecte la charge et il est appelé le déficit d'énergie (Deficiency of Power Supply DPS), elle est exprimée par:

$$DPS(t) = P_{ch} - (P_{prod}(t) + C_{bat}(t-1) - SOC_{bat_min}) \times \eta_{ond} \quad (2.9)$$

La probabilité de déficit d'énergie (DPSP) est la fraction de la somme de toutes les valeurs de perte d'énergie DPS(t) sur l'énergie totale demandé. La DPSP est définie par l'expression suivante :

$$DPSP = \frac{\sum_{t=1}^T DPS(t)}{\sum_{t=1}^T P_{ch}(t) \times \Delta t} \quad (2.10)$$

Une DPSP nulle est le cas parfait ou il signifie que la charge est toujours satisfaite.

2.6.2 Algorithme du dimensionnement

Cet algorithme permet de déterminer le nombre des panneaux PV et générateur éoliennes (N_{PV}, N_w) qui satisfont la condition sur la 'DPSP'. Seule une analyse économique permet de déterminer le dimensionnement optimal du système hybride [13].

Les données d'entrée de l'algorithme de la méthode DPSP qui d'écrit précédemment sont :

- L'éclairement solaire sur un plan incliné,
- Les valeurs moyennes de la température ambiante,
- La vitesse du vent pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année,
- La valeur de la 'DPSP' désirée sur une année,
- Les paramètres techniques des différents composants du système.

Les paramètres de l'algorithme :

- N_{PV_max} : le nombre maximal des générateurs PV disponibles.
- N_{w_max} : le nombre maximal des générateurs éoliens disponibles.
- N_{Sd} : le nombre de jours d'autonomie

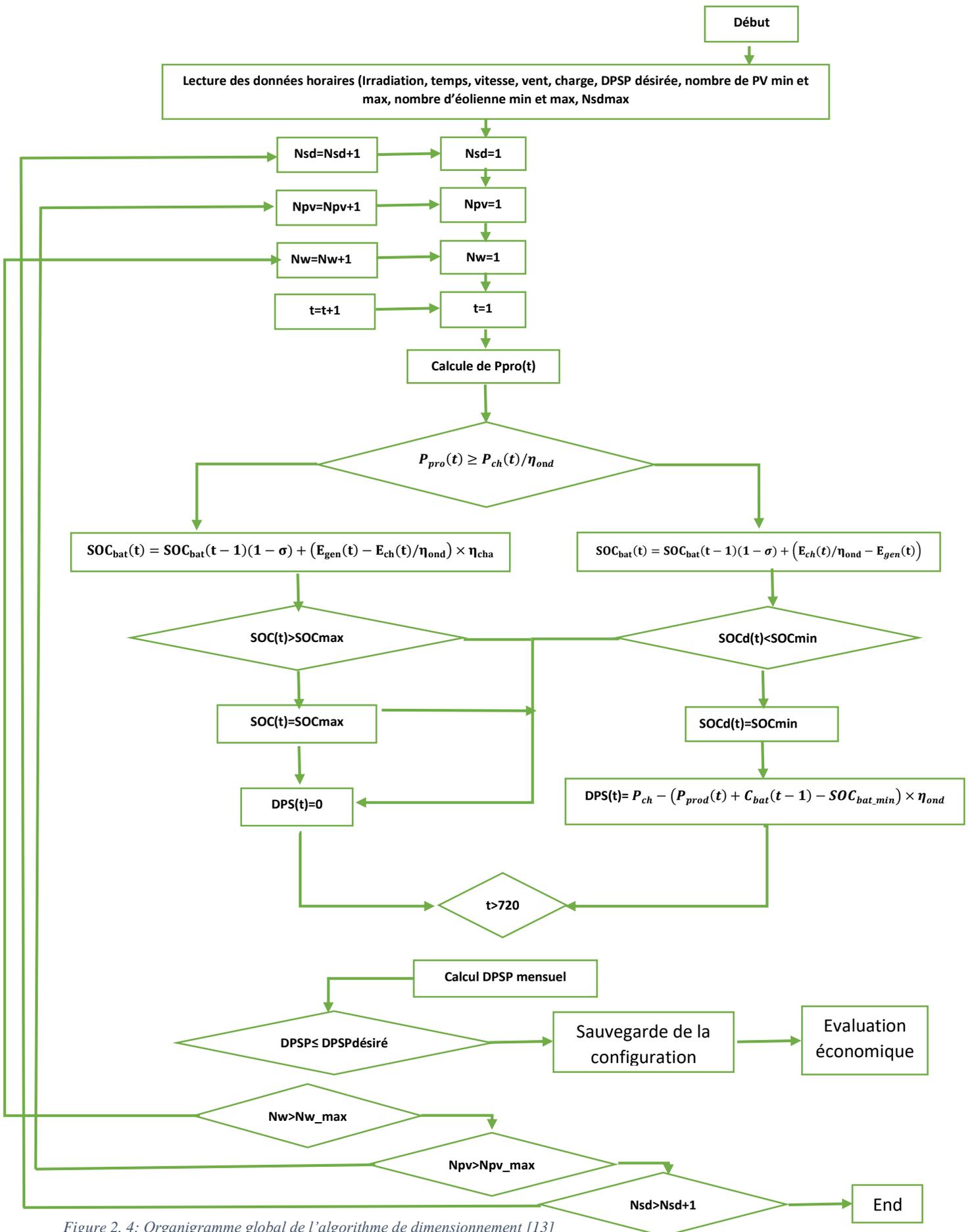


Figure 2. 4: Organigramme global de l'algorithme de dimensionnement [13]

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons connu les différentes méthodes et techniques d'optimisation pour dimensionner et optimiser un SEH et nous avons également cité les modèles mathématiques de différents composants de SEH.

Chapitre 3 :

Résultats et

Interprétations

3.1 Introduction

Récemment, l'Algérie s'est engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, avec un programme gouvernemental qui consiste à produire 22GW d'électricité de source renouvelable à l'horizon 2030. Le potentiel éolien est relativement faible par rapport au solaire photovoltaïque cependant il constitue la deuxième importance de développement en Algérie. Le système hybride pour cet objectif intègre essentiellement les générateurs photovoltaïques (PV) et autre générateurs tels que les éoliennes (WT) et les micros turbines à gaz (MT). Puisque les sources renouvelables sont fluctuantes aléatoirement et la capacité de production des micros turbines est limitée à une certaine plage, il est inclus un système de stockage d'énergie. Les micros turbines à gaz et/ou le système de stockage sont utilisés pour combler à tout moment l'écart entre la puissance demandée et la puissance produite par les deux sources renouvelables [1].

Le dimensionnement et le fonctionnement de chaque composant devra tenir compte des variations de la charge et des sources renouvelables afin d'optimiser l'utilisation de ces ressources, et minimiser le plus possible le coût d'investissement tout en satisfaisant la demande exigée par le consommateur. Dans ce travail, nous appliquons la méthode DPSP pour notre problématique. Cette technique sera l'atout vers l'obtention des solutions optimales, qui peut être ensuite le sujet d'une étude de la faisabilité en pratique de ce système du point de vue technique et économique.

Le dimensionnement des différents dispositifs pour un système hybride est très important et nécessite une étude approfondie des données météorologiques (l'éclairement, la température ambiante et la vitesse du vent) horaires et du profil de la charge de SARL BOUBLENTA pour obtenir la configuration optimale caractérisée par un coût minimal. Pour cela, nous avons programmé l'organigramme de la technique DPSP (Deficiency of power supply Probability) DPSP dans la plate-forme MATLAB, qui nous a donné les résultats présentés dans ce chapitre.

3.2 Critère d'optimisation

La fonction à minimiser est économique et dépend du coût d'investissement pour une période de référence égale à la durée de vie du système hybride. Le coût d'investissement considère le coût d'achat et d'installation des différents composants constituant le système hybride (les différents générateurs et unités de stockage), le coût de maintenance de chacun de ces composants et le coût de renouvellement des composants ayant une durée de vie inférieure à la durée de vie du système global. Certainement, la minimisation du coût d'investissement est vérifiée en trouvant le nombre optimal des générateurs et unités de stockage et en obéissant à des contraintes principalement basées sur la condition de satisfaction de la puissance de la charge.

Les unités de stockage ne participent pas à la production d'énergie mais elles permettent de mettre en réserve l'énergie électrique produite par les sources renouvelables pour une utilisation ultérieure. Donc elles ne sont pas prises en compte dans l'optimisation de la fonction objective. Le nombre des batteries à adopter dépend de l'autonomie indiquée par le cahier de charge. L'autonomie de réserve correspond au nombre souhaité de jours pendant lesquels le parc de batteries est capable d'alimenter en l'absence des sources renouvelables.

La fonction du coût d'investissement regroupe le coût d'achat et d'installation des composants, le coût de maintenance et le coût de renouvellement pour la durée de référence choisie [5] :

$$f = C_b + C_m + C_r + C_{inst} \quad (3.1)$$

" C_{inst} " est le coût d'installation du système.

" C_b " est le coût d'achat de chaque composant du système.

$$C_b = N_{PV}C_{PV} + N_{WT}C_{WT} \quad (3.2)$$

Où

N_{PV} , N_{WT} sont les nombres des générateurs photovoltaïques et éoliens respectivement.

C_{PV} , C_{WT} sont les coûts unitaires des générateurs photovoltaïques et éoliens respectivement.

" C_m " Est le coût de maintenance de chaque composant du système hybride.

$$C_m = T_{PV}N_{PV}M_{PV} + T_{WT}N_{WT}M_{WT} \quad (3.3)$$

Où

M_{PV} , M_{WT} sont les frais de maintenance par unité des générateurs photovoltaïques et éoliens respectivement.

T_{PV} , T_{WT} sont les nombres d'opération de maintenance nécessaires pendant la période de référence correspondant aux générateurs photovoltaïques éoliens respectivement.

" C_r " est le coût de renouvellement ou de remplacement de chaque composant ayant une durée de vie inférieure à la période de référence afin de garantir la continuité de son fonctionnement.

$$C_r = N_{PV}C_{PV}K_{PV} + N_{WT}C_{WT}K_{WT} \quad (3.4)$$

Où

K_{PV} , K_{WT} sont les nombres d'opération de renouvellement ou remplacement nécessaires pendant la période de référence correspondant aux générateurs photovoltaïques et éoliens respectivement.

3.3 Contraintes d'optimisation

Le bon fonctionnement d'un système hybride nécessite la maîtrise des moyens de production. La contrainte la plus importante à vérifier est le devoir d'assurer en permanence l'équilibre entre la production et la consommation. En effet, la puissance issue des générateurs PV, éoliennes et celle délivrée par le banc de batteries doit être égale à la demande de la charge à tout instant [14].

$$P_{ch}(t) = N_{PV}P_{PV}(T(t), G(t)) + N_{WT}P_{WT}(v(t)) \quad (3.5)$$

Où

" $P_{PV}(T(t), G(t))$ " est la puissance pouvant être débitée par un seul générateur PV. Elle dépend de la température " $T(t)$ " et l'irradiation " $G(t)$ " enregistrées à l'instant " t ".

" $P_{WT}(v(t))$ " est la puissance pouvant être débitée par un seul générateur éolien. Elle dépend essentiellement de la vitesse du vent $v(t)$ à l'instant " t ".

" $P_{ch}(t)$ " est la puissance demandée par la charge à l'instant " t ".

Les autres contraintes à vérifier correspondent aux limites supérieures des nombres de tous les composants à optimiser suivant le cahier de charge. Ces limites sont exigées à cause des contraintes de réalisations par exemple l'espace réservé au générateurs PV ne doit pas dépasser la surface du toit du bloc administratif. Ceci limite la quantité de panneaux photovoltaïques à installer. Les nombres de tous les composants à optimiser sont limités comme suit :

$$0 \leq N_{PV} \leq N_{PV}^{max}, \quad 0 \leq N_{WT} \leq N_{WT}^{max}$$

3.4 Formulation du problème

Le système énergétique proposé est conçu sur mesure des potentiels importants de la région. Ce système est de basse puissance destiné pour l'alimentation du bloc administratif de la SARL BOUBLENTA. Cette dernière est une entreprise qui se situe à Tlemcen sur la latitude de 34.97° et la longitude 1.44° . C'est une entreprise active depuis 1994 et pionnière dans la production des poudres de caroube.

Un site bénéficiant d'un bon potentiel solaire et éolien et d'une bonne complémentarité entre ces deux ressources devrait être propice à l'installation d'un système hybride. Ceci nécessite que l'on prenne en compte l'évolution des grandeurs qui caractérisent les potentiels énergétique dominants du site sur une longue période pour permettre de calculer la puissance électrique produite en présence des fluctuations des sources renouvelables (solaire et éolienne). Pour ce faire, On a estimé le potentiel énergétique primaire pendant une période d'un mois en enregistrant les données météorologiques disponibles (irradiation solaire, température et vitesse du vent) [14].

3.5 Résultats et discussions

La structure du système hybride nécessaire pour assurer l'approvisionnement en électricité de la charge adoptée dépend essentiellement des potentiels énergétiques dominants du site d'étude. Avoir recours aux énergies solaire et éolienne reste insuffisant pour palier au problème d'intermittence. Autres éléments sont à associer avec ces derniers notamment le système de stockage d'énergie. La mise en place d'un tel système a pour objectif d'améliorer la fiabilité des sources d'énergie renouvelables. On recherche ainsi éviter l'utilisation des turbines à combustion puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie en présence du système de stockage. L'architecture du système hybride choisis est présentée dans la figure 1.24.

L'utilisation des données météorologiques prélevées chaque heure au sein du site avec des particularités climatiques différentes permet une analyse plus détaillée de l'influence du climat sur le fonctionnement du

système hybride. Il convient donc de convertir les données météorologiques prélevées en données météorologiques « utiles » pour notre travail [14].

3.5.1 Prélèvement des données climatiques et de la charge du site

Les données méthodologiques (Irradiation, Température, Vitesse du vent) sont prélevées sur le site à chaque heure de la journée durant la période de référence (du 10 Février jusqu'au 11 Mars 2020). Ces données sont utiles pour le calcul des puissances PV et éolienne horaire disponible. Alors que les mesures de la consommation d'énergie électrique du bloc d'administration a été prises à chaque heure à l'aide d'un compteur d'énergie électrique. Les charges enregistrées sont dues essentiellement aux appareils de bureautique le jour et l'éclairage et l'arrosage pendant la nuit.

La méthodologie de dimensionnement basée sur les valeurs des pires scénarios présente une tendance à surdimensionner les composants du système car le pire des cas mène à une faible probabilité d'occurrence. Cependant la méthodologie basée sur les valeurs moyennes pour un système hybride avec stockage amortie le surdimensionnement surtout pour une autonomie de réserve assez élevée. Le tableau suivant représente les valeurs moyennes des mesures prises dans le site [14].

Tableau 3. 1: les données météorologique du site d'étude [14].

| Heures (h) | Eclairement (Wh/m ²) | Température (C°) | Vitesse du vent (m/s) | Consommation (kWh) |
|------------|----------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| 01 :00 | 0 | 10,0625 | 2,86090278 | 4,473125 |
| 02 :00 | 0 | 9,5625 | 3,07486111 | 4,473125 |
| 03 :00 | 0 | 9,375 | 2,98472222 | 4,473125 |
| 04 :00 | 0 | 8,625 | 2,90451389 | 4,473125 |
| 05 :00 | 0 | 8,4375 | 3,05180556 | 4,473125 |
| 06 :00 | 0 | 8 | 2,69090278 | 4,473125 |
| 07 :00 | 0 | 8,375 | 3,03215278 | 4,473125 |
| 08 :00 | 54,4414063 | 9,125 | 2,97340278 | 4,473125 |
| 09 :00 | 160,033594 | 9,9375 | 3,07729167 | 6,43 |
| 10 :00 | 313,660156 | 11,375 | 3,43194444 | 7,275 |
| 11 :00 | 516,960938 | 13,5 | 3,929375 | 7,68125 |
| 12 :00 | 683,371094 | 15,8125 | 3,99631944 | 7,61875 |
| 13 :00 | 781,769531 | 17,6875 | 3,90736111 | 5,80625 |
| 14 :00 | 830,730469 | 19 | 4,63548611 | 4,86875 |
| 15 :00 | 828,015625 | 20,0625 | 4,53340278 | 5,475 |
| 16 :00 | 771,292969 | 20,0625 | 4,36326389 | 5,78125 |
| 17 :00 | 667,550781 | 19,4375 | 4,35013889 | 5,275 |
| 18 :00 | 561,132813 | 18,5625 | 4,10138889 | 4,08 |
| 19 :00 | 351,449219 | 17,375 | 3,86395833 | 4,473125 |
| 20 :00 | 161,761719 | 16,0625 | 3,01680556 | 4,473125 |
| 21 :00 | 13,796875 | 14,8125 | 2,42541667 | 4,473125 |
| 22 :00 | 0 | 13,375 | 2,33027778 | 4,473125 |
| 23 :00 | 0 | 12,375 | 2,535 | 4,473125 |
| 24 :00 | 0 | 11,0625 | 2,10819444 | 4,473125 |

Les générateurs choisis doivent être disponibles au marché et réputés par un très bon rapport qualité/prix. Ses puissances crêtes sont choisies surtout pour le bon rendement instantané qui leur est attribuée. Un autre critère technique pour le bon choix de ces générateurs est que la tension maximale et le courant admissible doivent correspondre à ceux des convertisseurs à utiliser. Le tableau suivant résume les caractéristiques techniques des générateurs choisis.

Tableau 3. 2: les caractéristiques des composantes utilisées [14].

| Générateurs | Constructeur | Références | Puissance unitaire (W) | Prix unitaire | type |
|---------------|--------------|------------|------------------------|---------------|-----------------|
| Panneaux | ZYTECH SOLAR | ZT300P | 300 | 46.2€ | Polycristallin |
| Mini-éolienne | Flex Pro | EOL/3000 | 3000 | 2950.0€ | Axe horizontale |
| Batteries | ULTRACELLI | UCG250-48 | 48V/250Ah | 1840.0€ | Gel |

Bien que la période du prélèvement des mesures s'étale sur les mois de Février et Mars qui est considérée comme étant une période défavorable, les valeurs mesurées indiquent une quantité très importante d'énergie solaire. De plus le site est caractérisé par un nombre d'heures d'irradiation important ; dépassant les 7 heures/jour et une température extérieure assez idéale pour un bon fonctionnement du module photovoltaïque. Ainsi, l'exploitation de ressource solaire dans cet endroit est une bonne approche pour assurer l'approvisionnement en électricité du site. L'histogramme suivant montre la distribution horaire de la puissance pouvant être extraite par un panneau ZT300P dans les conditions d'irradiation et de la température mentionnées au tableau 3.1.

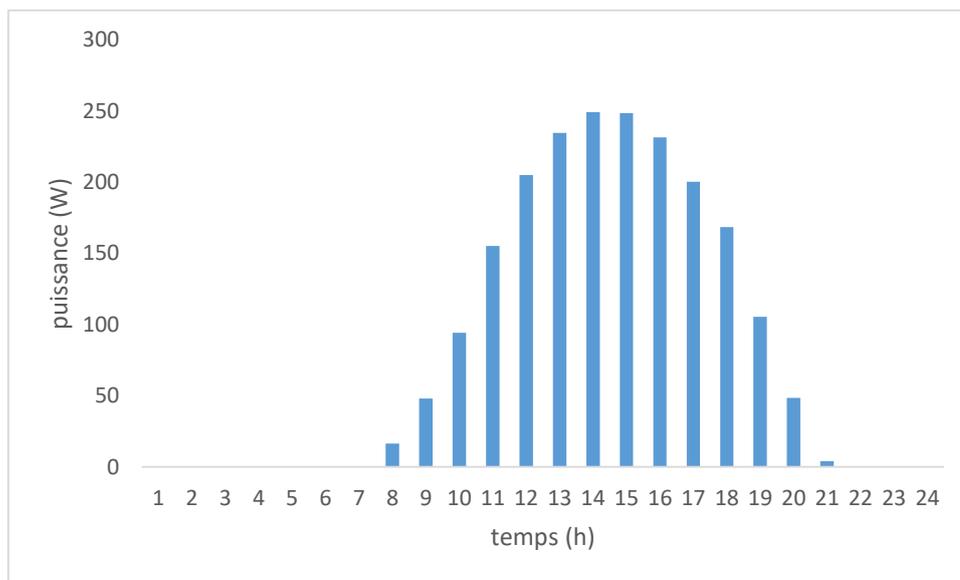


Figure 3. 1: la distribution horaire de la puissance extraite par un panneau ZT300P

Pour estimer la puissance pouvant être produite par les générateurs éoliens, on utilise la courbe de puissance caractéristique qui a une forme cohérente du profil de la vitesse du vent. Cette dernière a été mesurée à 10 m de hauteur car la rugosité du sol provoque de fortes turbulences. Il est clair qu'elle est très fluctuante dont une bonne quantité de vent circulant l'après-midi durant la période de mesures. Les vitesses du vent enregistrées entre 3m/s et 5m/s et qui seront plus importantes à des hauteurs plus élevées montrent l'importance de l'exploitation de l'énergie éolienne sur le site d'étude. L'histogramme suivant montre la distribution horaire de la puissance pouvant être extraite par l'éolienne EOL/3000 dans les conditions climatiques mentionnées au tableau 3.1.

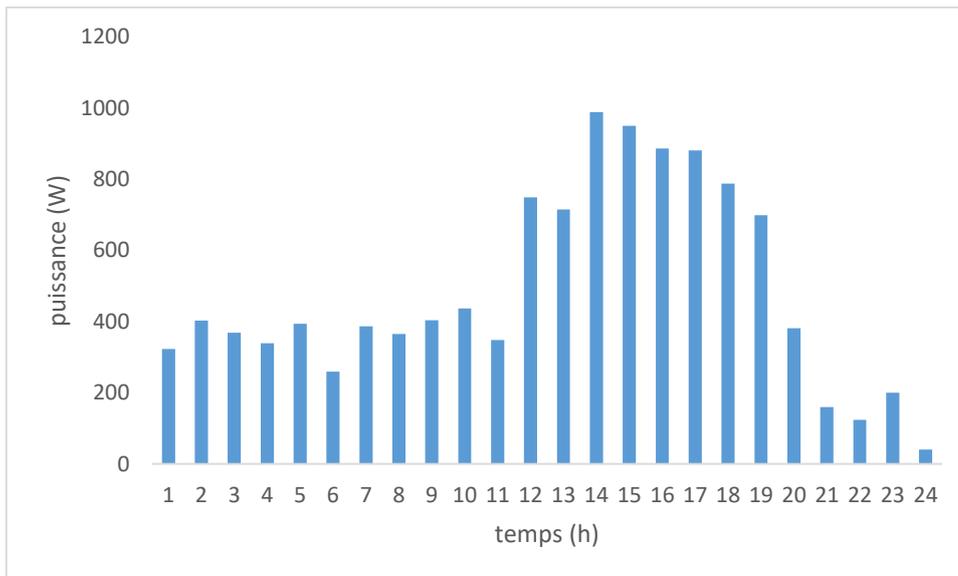


Figure 3. 2: la distribution horaire de la puissance extraite par l'éolienne EOL/3000

Le profil quotidien de la charge (figure 3.3) dépend principalement de la consommation du bloc administratif pendant le jour et l'arrosage et l'éclairage pendant la nuit. Il est clair qu'une activité importante de la charge durant les heures de travail à partir de 08h00 et qui atteint un pic de consommation à 11h00. Durant le soir et la nuit, on enregistre une distribution constante de la consommation due principalement à l'éclairage et l'arrosage.

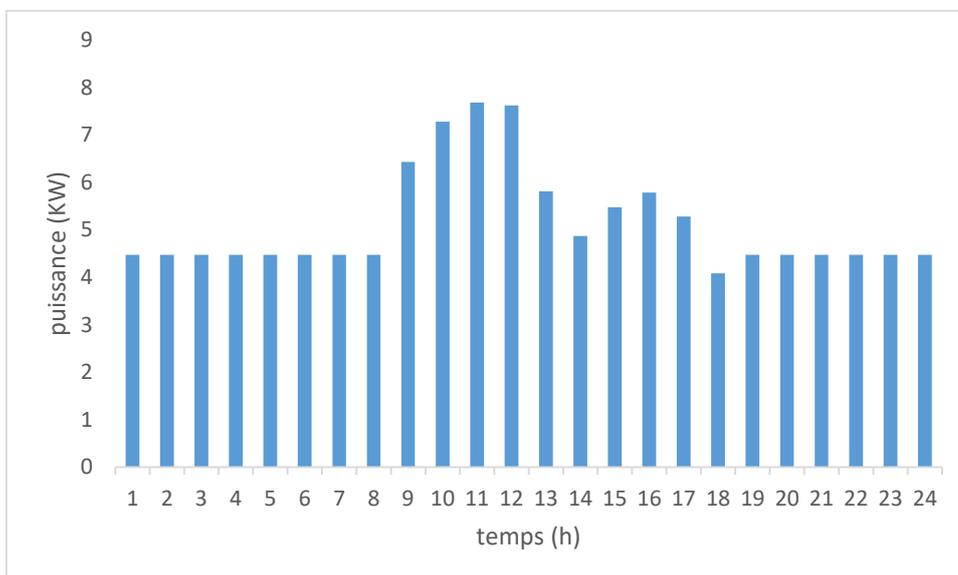


Figure 3. 3: Le profil quotidien de la charge

3.5.2 Dimensionnement du système de stockage

Cette étape est importante qui nous permet d'obtenir le nombre d'unité de stockage nécessaire pour couvrir la demande de la charge en absence de tous les sources pour une période d'autonomie précise. Le dimensionnement des batteries nécessite une surestimation pour compenser les pertes de puissance dans la chaîne de production et de conversion. Le rendement de cette dernière est médiocre à cause de différentes

pertes pouvant être enregistrées. A savoir, le rendement faible des panneaux photovoltaïques, les pertes au niveau des convertisseurs d'électronique de puissance et les pertes au niveau de la batterie dues à la différence entre la puissance de chargement et la puissance de déchargement.

Maintenant, nous calculons la capacité du parc de batteries en fonction de la charge et de l'autonomie de la réserve souhaitée à l'aide de l'équation (2.4). Le nombre de jour d'autonomie de système hybride correspond au nombre de jours pendant lesquels notre système de stockage (banc de batteries) n'a pas besoin d'être rechargé tout en assurant l'alimentation de la charge. Cela représente le nombre de jours consécutifs probables sans ressources renouvelables qui est évaluée au moyen de 3 jours.

Une fois avoir déterminé l'énergie quotidienne de la charge à partir du profile quotidien de la puissance donnée au tableau 3.1, la capacité totale du banc de batteries pour une autonomie de 72h pour sera calculé en utilisant l'équation (2.4). Sachant les caractéristiques techniques de la batterie UCG250-48 de « ULTRACELLI », le nombre de batteries constituant le système de stockage est simplement déduit en divisant la capacité totale par la capacité d'une seule batterie.

$$C_B = \frac{E_L \cdot N_{sd}}{V_B \cdot DOD_{max} \cdot T_{cf} \cdot \eta_B} = 106697.048 \text{ KWh}$$

$$N_{bat} = \frac{106697.048}{250 \times 48} = 8.89$$

Donc le nombre des batteries nécessaire afin d'avoir 3 jours d'autonomie est 9.

3.5.3 Dimensionnement optimal des générateurs

Dans ce travail, nous adopterons un modèle de puissance entrée/sortie, qui a pour rôle l'estimation de l'énergie produite par les générateurs photovoltaïque éolien à partir des données de l'irradiation globale, la température ambiante et la vitesse du vent. Ceci exige la connaissance des données des constructeurs des générateurs à utiliser.

Le dimensionnement des générateurs PV et éolien sera évalué grâce à la méthode DPSP. Cette méthode minimise la fonction objective après avoir introduit les données initiales principales (Données météorologiques, contraintes et paramètres initiales des algorithmes). L'organigramme d'exécution de la procédure de recherche de la meilleure configuration est donné dans la figure 2.4.

Après avoir élaboré l'algorithme et le programme d'optimisation sur la plateforme MATLAB, le programme parte des valeurs initiales et converge vers les nombres optimaux des générateurs à utiliser. Notre méthode a été appliquée avec succès pour la recherche la recherche de la configuration optimale. Cet algorithme nous calcul le nombre optimale de chaque générateur afin d'avoir la puissance désiré avec le faible cout possible.

D'après le programme, on constate que la quantité de générateurs PV nécessaire est uniquement 30 panneaux au lieu de 100 panneaux. Cela indique que le programme a économisé 70 panneaux photovoltaïques.

Le coût de production du kWh éolien est aussi compétitif avec les sources classiques de production d'énergie. Cependant, la mini-éolienne EOL/3000 de FlexPro, malgré qu'elle s'adapte avec les sites moins ventés, ne pourra pas fonctionner dans les conditions nominales correspondant à une vitesse aux alentours de 10m/s. Notre site est caractérisé par une vitesse qui ne dépasse pas 5m/s et ainsi le rendement sera faible rendant ainsi le nombre optimal des mini-turbines éoliennes égale à un.

La figure ci-dessous représente l'état de charge et de décharge du parc de batteries en 24 heures. Nous notons que les batteries sont en état de décharge dans les premières et dernières heures de la journée, afin de faire fonctionner la pompe d'irrigation et l'éclairage, en plus à l'absence de la source solaire. Et on note une augmentation de l'état de charge au cours de l'après-midi et cela est dû à l'absence d'arrosage Et la production énergétique de deux sources qui satisfait les besoins énergétiques.

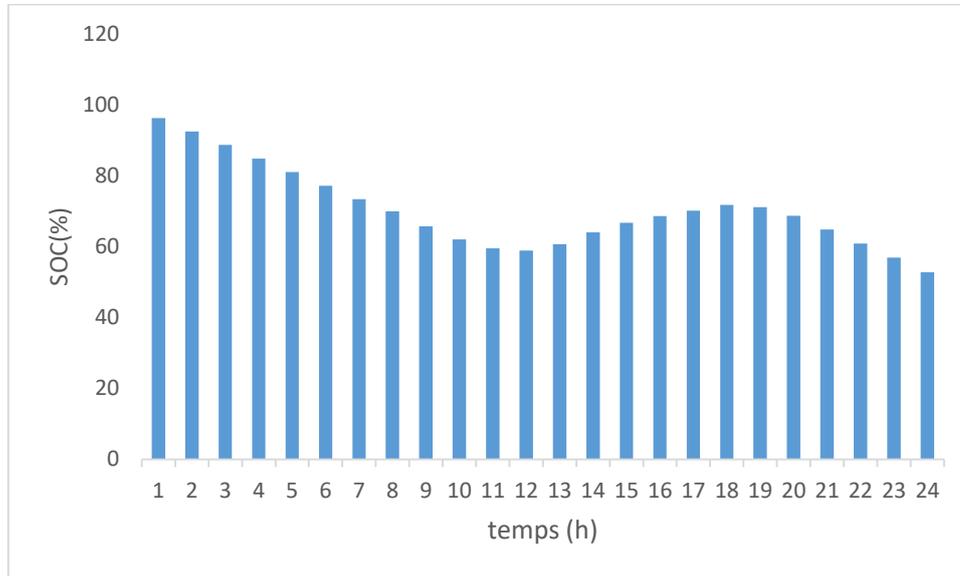


Figure 3. 4: Etat de charge de batterie

3.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimal d'un système hybride alimentant le bloc administratif de la SARL BOUBLENZA, Tlemcen, Algérie. Pour atteindre cet objectif, nous avons développé un programme de dimensionnement (DPSP) avec minimisation du coût d'investissement afin d'aboutir à la configuration la plus économique est qui satisfait les besoins énergétiques de la charge. Le programme développé a conduit à une configuration majoritairement d'origine solaire.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons abordé le dimensionnement optimal d'un system énergétique hybride en utilisant la méthode DPSP pour l'exemple de l'entreprise SARL Boublenza. Nous avons pris cette entreprise avec toutes les conditions métrologiques nécessaire notamment la vitesse du vent, l'irradiation journalière et la température afin que notre algorithme calcule le nombre optimal des générateurs PV et générateurs éoliennes qui répondent au besoin énergétique de l'entreprise.

En effet l'étude technique des technologies disponibles est une étape primordiale dans l'étude de faisabilité des systèmes hybrides. Les données météorologiques du site montrent qu'il bénéficie d'un bon potentiel solaire dominant et un potentiel éolien moyen.

Le programme développé a effectivement conduit à une configuration majoritairement d'origine solaire. La configuration obtenue est formée uniquement des générateurs) base d'énergies renouvelables ce qui a pour conséquence la réduction énorme des quantités de combustible nécessaires par rapport à un système purement thermique. Ceci conduit à une alimentation en électricité sobre en carbone avec un impact environnemental fortement réduit.

Ce travail est loin d'être achevé. Nous pouvons proposer comme pistes pour des projets à venir et comme perspectives suivantes :

- Introduire dans notre programme le calcul du coût actualisé de l'énergie (levelized cost of energy) pour pouvoir le comparer avec le coût d'énergie du réseau électrique publique pour ainsi discuter la viabilité de ce genre de système en Algérie.
- Appliquer autres méthodes de dimensionnement pour l'analyse technique du système hybride et la comparer avec notre résultat.
- Faire l'hybridation de cette méthode avec une technique évolutionnaire qui minimise le risque de convergence à des minimums locaux.

Bibliographie

- [1] D. Boudia, «Centre de Développement des Energies Renouvelables», <https://www.cder.dz/spip.php?rubrique40>, Date d'accès. Juin 2022.
- [2] Z. TIR, «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone», mémoire de majester, Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie, 2010.
- [3] D. BENATIALLAH, «Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie» Thèse doctorat de l'université africaine AHMED DRAIA, Adrar, Algérie, 2019.
- [4] K. BOUCHOUICHA, «modélisation multispectrale des image satellitaire,» Université des sciences et de la technologie D'oran, memoire de doctorat, Algérie, 2017.
- [5] R. SEBAA, Y. BENAMMAR, «Etude de faisabilité et dimensionnement d'un système hybride à base d'énergies renouvelables», Projet fin d'étude, Ecole supérieur en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2021.
- [6] M. L. LOUAZENE, «Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla», Thèse de magister, Université de Batna 2, Algérie, 2008.
- [7] A. LABOURET, P. CUMUNEL, J. BRAUN, B. FARAGGI, «Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque», 5eme édition, Eyrolles 2010.
- [8] D. MESQUITA, H. MOREIRA, J. L. S. SILVA, M. K. DA SILVA, MARCELO G. VILLALVA, «A review and analysis of technologies applied in PV modules», 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Brazil 2019.
- [9] D. BOUKHERS, «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage», Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2007.
- [10] O. SLIMANI, M.F. MEZIANI, « Dimensionnement d'un système énergétique hybride "solaire-éolien-batteries" combinant la technique LPSP et la méthode des moindres carrés», mémoire de fin d'étude, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES DE TLEMCCEN, Algérie, 2022.
- [11] Bouharchouche, A. Bouabdallah, E. M. Berkouk, S. Diaf, H. Belmili, «Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque », article de recherche, Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3, Algerie, 2014.
- [12] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, « Optimal sizing method for stand-alone hybrid PV/wind power generation system », article de recherche, Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza, Algérie, 2010.
- [13] S.A. Derai, A. Kaabeche, « Modélisation et dimensionnement d'un système hybride Eolien/Photovoltaïque autonome », article de recherche, Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°2, Algeria, 2016.
- [14] M.A. Ben Lakehal et Y. Amoura, «Dimensionnement optimal par essaim particulaire et par algorithme génétique d'un système énergétique hybride pour l'alimentation du bloc administratif de la SARL Boublenza», Mémoire de master, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES DE TLEMCCEN, Algérie, (2020).