

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--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 d'Ingénieur

Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Energie et environnement**

Présenté par : **BERRACHEDI Ali**
Thème

**Conception et réalisation d'un système de
sélection d'une cellule multi-sources.**

Soutenu publiquement, le 18 / 06 /2019, devant le jury composé de :

Mr G. Abdellaoui	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Mr M. Mebrouki	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr M. Belhadj Aissa	Ingénieur	SKTM. Ghardaia	Co- Directeur de mémoire
Mr A. Tahour	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examinateur
Mr A. Kerboua	MCB	ESSA. Tlemcen	Examinateur

Année universitaire : 2018/2019

Abréviations

PV : Système photovoltaïque

SH : Système hybride

MPPT : Maximum Power Point Tracking

STEP : Stockage gravitaire par pompage,

CAES : Stockage par air comprimé,

GHI : Global Horizontal Irradiance

CSP : Concentrating Solar Power

DNI : Direct Normal Irradiance

OPF : Optimal Power Flow

P2G : Conversion d'électricité en gaz (Power to gas)

PID : Proportionnelle intégrale/dérivée

MPC : Model Predictive Control

LFC : Load-Frequency Control

AGC : Automatic Generation Control

GPS : Global Positioning System

Résumé

Ce mémoire est consacré à l'étude d'un système de production d'énergie électrique basée sur la combinaison de différents types de sources d'énergie renouvelable et classique (système multi-source). On a présenté les composants d'une centrale multisources ainsi que les méthodes de supervision et de la gestion de puissance. La modélisation et la configuration des systèmes multisources (PV, Eolienne, Diesel) et les différents types d'hybridation sont aussi présentés. Ensuite, le logiciel Homer est utilisé dans la simulation et le dimensionnement d'une carte de commande multisources (PV, éolienne, diesel, réseaux). Enfin, une carte de commande à faible puissance avec acquisition des données est présentée, avec principe de fonctionnement et objectif.

Mots clés : système multi-sources, système hybride, gestion de puissance, système de supervision

Abstract

This dissertation is devoted to the study of a multisource system for the production of electrical energy based on different types of sources, renewable and conventional. We begin with the state of the art of multisource systems where we presented the components of a multisource plant and the methods of supervision and power management. Then, the modeling and configuration of the systems multisources (PV, Wind, Diesel) and the different types of hybridization are discussed. After that, the simulation and sizing of a multisource control board (PV, wind turbine, Diesel, electrical networks) using Homer software is presented. Finally, we present our low power control card of a multisource system with data acquisition, by explaining its purpose and operating principle..

Key words : multi-source system, hybrid system, power management, supervision system

ملخص:

هذه الأطروحة مخصصة لدراسة نظام لإنتاج الطاقة الكهربائية يعتمد على مزيج من أنواع مختلفة من مصادر الطاقة المتجددة والتقليدية (نظام متعدد المصادر). قدمنا مكونات نظام متعدد المصادر وكذلك طرق مراقبة وإدارة الطاقة. كما قمنا بتقديم نماذج و تكوين أنظمة متعددة المصادر (الطاقة الضوئية ، توربينات الرياح ، الديزل) وأنواع التهجين المختلفة.

بعد ذلك قمنا باعتماد برنامج محاكاة HOMER لمحاكاة لوحة التحكم متعددة المصادر (الطاقة الضوئية، طاقة الرياح ، الشبكة الكهربائية و الديزل).

أخيرًا يتم تقديم بطاقة تحكم منخفضة الطاقة مع شرح مبدأ التشغيل والغرض.

الكلمات المفتاحية :

أنظمة متعددة المصادر ، أنظمة الطاقة الهجينة ، إدارة الطاقة ، أنظمة الإشراف

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant et miséricordieux, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail. Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à notre cher enseignant, mon directeur de mémoire de projet de fin d'étude, Monsieur Mohamed Mebrouki pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de la période du projet.

Je tiens à remercier également mon co-directeur, ingénieur à l'entreprise SKTM Monsieur Mohammed Belhadj Aissa pour le temps qu'il m'a consacré et pour les précieuses informations qu'il m'a prodiguées avec intérêt et compréhension.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres de jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Je ne laisserai pas cette occasion passer sans remercier monsieur le directeur de notre école Dr. Bouchrit ROUISSAT, tous les enseignants et le personnel de l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen.

Je remercie également mes camarades et amis : Merbah, Riadh, Lamine, Karim, Abdelhak, Taher, Youcef, Juba, Reda, pour leur aide précieuse et surtout pour leur sympathie.

Enfin, je voudrais dédier ce mémoire, avec un merci très spécial, à mes parents : Merci de m'avoir soutenu et permis d'effectuer le parcours qui m'a amené où je suis aujourd'hui.

Une mention toute spéciale à ma famille : Mes soeurs Yassmina et Rania, mon beau frère Abderaouf pour m'avoir encouragé pendant les moments difficiles de ma vie d'ingénieur et pour leurs soutiens indéfectibles. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et mon amour.

Table des matières

Abréviations	I
Résumé	II
Abstract	III
ملخص	IV
Remerciment	V
Table des matières	6
Introduction générale	1
1 État de l'art des systèmes multi-sources	3
Introduction	3
1.1 Intérêt de l'hybridation des sources (Systèmes multi-sources)	5
1.1.1 Composition d'une centrale multi-sources	5
1.2 Différents éléments d'une centrale multi-sources	7
1.2.1 Générateurs à combustion traditionnels (Micro-turbine)	7
1.2.2 Éléments de stockage (batterie, super capacité, volant d'inertie.)	8
1.3 Générateurs renouvelables	10
1.3.1 Potentiel solaire algérien :	10
1.3.2 Potentiel éolien algérien :	11
1.3.3 Potentiel biomasse / Recyclage des Déchets	12
1.3.3.1 Quantité des déchets	12
1.4 Gestion de la puissance dans les systèmes hybrides :	12
1.5 Supervision multi-niveaux des centrales multi-sources	13

1.5.1	Supervision à moyen terme et long terme	14
1.5.1.1	Niveau 3 (horizon : une année à plusieurs années)	14
1.5.1.2	Niveau 2 (horizon : 1 jour à une semaine)	15
1.5.2	Supervision à court terme :	15
1.5.2.1	Niveau 1 (Horizon : 10 à 15 minutes)	15
1.5.2.2	Niveau 0 (très près du temps réel)	16
1.6	État de l'art des techniques de supervision des systèmes multi- sources	18
1.6.1	Méthodes de supervision avec ou sans modèle :	18
1.6.1.1	Méthode « sans » modèle	19
1.6.1.2	Méthodes à base de modèles	20
1.6.1.3	Modèles physiques	20
1.6.1.4	Modèle « boîte grise »	21
1.6.1.5	Modèle « boîte noire »	21
1.6.1.6	Méthode hybride	21
1.7	Méthodes de supervision classées selon l'approche	22
1.7.1	Stratégies de supervision basées sur des règles	22
1.7.2	Techniques globales d'optimisation	23
1.7.3	Commande prédictive	25
1.8	Pilotage optimal des systèmes de chauffage dans le secteur du bâtiment	26
1.9	Gestion de la puissance dans les véhicules hybrides	26
1.10	Systèmes multi-sources de production d'électricité à base d'énergies renouvelables	27
1.11	Conclusion	29
2	Configuration des systèmes multi-sources (PV, Éolien, Diesel)	30
2.1	Introduction	30
2.2	Composants de la cellule multi-sources	31
2.2.1	Schéma de la micro-turbine	31
2.2.2	Caractéristiques des types de batterie du système de stockage	32
2.2.3	Schéma d'un générateur photovoltaïque	32
2.2.3.1	La cellule photovoltaïque	33
2.2.4	Caractéristiques d'un aérogénérateur	37
2.2.4.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	38
2.3	Description d'un système hybride	39

2.3.1	Généralités sur un système PV	41
2.3.2	Système hybride PV/Diesel	42
2.3.3	Catégories de systèmes hybrides PV/Diesel	42
2.3.3.1	Configuration PV/Diesel série :	42
2.3.3.2	Configuration PV/Diesel commuté	43
2.3.3.3	Configuration PV/Diesel parallèle	44
2.3.4	Système Hybride PV/Diesel/Éolien	46
2.4	Analyse économique d'un système hybride	46
2.4.0.1	Coût d'un système multi-sources (photovoltaïque, éolien, diesel) :	48
2.5	Conclusion	48
3	Simulation d'une cellule de sélection multi-sources (PV, Éolienne, Diesel, Réseaux)	49
3.1	Introduction :	49
3.2	Présentation des logiciels de simulation	49
3.3	Simulation à l'aide de Logiciel Homer	51
3.3.1	Localisation de notre site (ESSA Tlemcen)	51
3.3.2	Définir le profil de la charge	51
3.3.3	Données météorologiques fournies par le logiciel HOMER	52
3.3.3.1	Températures moyennes sur le site de l'ESSAT	52
3.3.3.2	Irradiation moyenne sur le site de l'ESSAT	52
3.3.3.3	Profil du vent mensuel moyen de l'ESSAT :	54
3.3.4	Schéma électrique de la cellule multi-sources	54
3.3.5	Résultats de la simulation	55
3.4	Conclusion	57
4	Réalisation de la cellule de sélection	58
4.1	Introduction	58
4.2	Principe de fonctionnement	58
4.2.1	Organigramme	58
4.3	Étaps de Réalisation	61
4.3.1	Simulation	61
4.4	Conclusion	65

Conclusion générale

66

Table des matières

Table des figures

1.1	Intégration de nouveaux modes de production d'électricité dans les réseaux électriques (source :Institute for Energy and Transport)	4
1.2	Comparaison entre l'offre éolienne et la demande [1]	4
1.3	Exemple des éléments constituant un système hybride	8
1.4	Avantages de l'utilisation des micro-turbines	9
1.5	Répartition géographique du potentiel éolien algérien [14]	11
1.6	Gestion de l'énergie d'un système hybride, sur plusieurs niveaux selon l'échelle de temps.	14
1.7	Schéma de classification des fonctions de contrôles dans les systèmes hybrides .	19
1.8	Classification de stratégies de supervision des systèmes multi-sources.	22
1.9	Nombre d'articles publiés utilisant les techniques d'optimisation appliquées aux énergies renouvelables [18].	24
2.1	Schéma d'une micro-turbine [34].	31
2.2	Paramètres des types de batterie [4].	33
2.3	Schéma d'un générateur photovoltaïque.	33
2.4	Modèle d'une cellule élémentaire.	34
2.5	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	34
2.6	Caractéristique $I_c=f(V_c)$ d'une cellule photovoltaïque.	35
2.7	Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque [38].	36
2.8	Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur [39].	37
2.9	Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse de rotation de la turbine (tip speed ratio) pour différents types d'éolienne [2].	39
2.10	Schéma global d'un système hybride [14].	40

2.11	Architecteur de système électrique hybride.	41
2.12	Système hybride PV/Diesel Série	43
2.13	Système hybride PV/Diesel Commuté	44
2.14	Système hybride PV/Diesel parallèle.	45
2.15	Schéma d'un système hybride PV/Diesel/éolien.	46
3.1	Profil de charge de notre cellule installé sur le site ESSA Tlemcen.	51
3.2	Profil de charge de notre cellule installé sur le site ESSA Tlemcen.	52
3.3	Températures moyennes sur le site de l'ESSAT.	53
3.4	Profil de la ressource solaire.	53
3.5	montre le profil du vent moyen pour chaque mois de l'année. Il varie entre 4 et 5 m/s.	54
3.6	Schéma de la cellule multi-sources sur le logiciel HOMER.	55
3.7	Caractéristique de l'éolienne de 1.8kW.	55
3.8	Résultats de simulation de la cellule sous HOMER.	56
3.9	Quantité d'énergie totale mensuelle produite par le système hybride pendant une année.	56
4.1	Schéma global de la cellule multi-sources.	59
4.2	Organigramme de fonctionnement de la cellule en mode manuel.	60
4.3	Organigramme de fonctionnement de la cellule en mode automatique.	60
4.4	PCB de la carte sous Isis Proteus V8.	62
4.5	Le circuit imprimé de la carte de puissance réalisé par le logiciel Isis proteus.	62
4.6	Photos en 3D de la carte de puissance.	63
4.7	Vues de face et de derrière de la carte de puissance.	63
4.8	les composants principaux de la cellule.	64

Liste des tableaux

4.1 Principaux composants électroniques utilisés dans la réalisation de la carte de commande 69

liste des Annexes

Introduction générale

Au vingtième siècle, la population mondiale a été multipliée par quatre : il y avait 1,6 milliard de personnes sur Terre en 1900 et 6 milliards en l'an 2000. Pendant ce temps-là, la consommation de l'énergie a été multipliée par vingt. Or, aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'humanité sont couverts en très grande partie par les énergies fossiles (80%) qui sont de nature polluante. Partout dans le monde, la conjoncture de l'instabilité des marchés des énergies fossiles et l'impératif de protection de l'environnement et de réduction des émissions de gaz à effet de serre imposent une révision des stratégies énergétiques. A cet effet, les énergies renouvelables (énergies qui se renouvèlent à une proportion (rythme) plus grande que celle à laquelle est consommée par les humains) disposent d'atouts essentiels pour prendre la première place dans les bouquets énergétiques des pays. Ainsi, elles permettant de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et partant, minimiser les effets néfastes du réchauffement climatique. Aussi, elles constituent une réponse particulièrement adaptée aux besoins énergétiques considérables des pays émergents qui assurent aujourd'hui l'essentiel de la croissance mondiale, en leur permettant de valoriser leurs ressources naturelles, hydraulique, ensoleillement, vent, biomasse, etc, de rapprocher les sites de production des centres de consommation et de réduire la dépendance de ces pays aux énergies fossiles.

Cependant, les énergies renouvelables ont aussi leurs inconvénients. Elles sont connues pour être moins compétitives que les systèmes de production traditionnels, principalement à cause de leurs coûts relativement élevés. En outre, le caractère aléatoire et discontinu des énergies renouvelables les rend difficiles à maîtriser et il est nécessaire de caractériser le plus précisément possible les variations de ces ressources. La puissance variable et non garantie produite par ces sources d'énergie peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH) ou système multi-sources.

Ce mémoire de projet fin d'étude s'inscrit justement dans cette vision en traitant un cas simple de combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelables (panneaux solaire et éo-

lienne) et d'autres non renouvelables (source diesel et réseau électrique). Techniquement parlant, le présent travail a été couronné la réalisation d'un systèmes de sélection d'une cellule multi-sources à faible puissance.

Le présent mémoire est organisé de la manière suivante : Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art des systèmes multi-sources. Au cours de ce chapitre nous avons présenté les composants d'une centrale multi-sources ainsi que les méthodes de supervision et de la gestion de puissance. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la configuration des systèmes multi-sources (PV, éolienne, Diesel) et les différents types d'hybridation. Le troisième chapitre concerne la simulation et le dimensionnement d'une carte de commande multi-sources (PV, éolienne, diesel, réseau) à l'aide du logiciel Homer. Le quatrième chapitre vise à présenter le principe de fonctionnement et les objectifs de montage de notre système de sélection d'une cellule multi-sources.

Chapitre 1

État de l'art des systèmes multi-sources

Introduction

L'arrivée des diverses technologies de génération électrique est en train de favoriser un profond changement des réseaux électriques actuels dans les prochaines années. La Figure (1.1) présente l'intégration de nouveaux modes de production d'électricité dans les réseaux électriques. Plusieurs types d'acteurs sont amenés à interagir au sein d'un réseau électrique. En effet, les producteurs assurent la production de la puissance électrique grâce à des centrales de production d'électricité. Lorsque ces centrales sont de type thermique ou nucléaire utilisant des énergies fossiles (charbon, fuel, gaz), elles constituent des sources de puissance non renouvelables dans le sens où la consommation de ces énergies est plus rapide que leur renouvellement naturel. Par contre, lorsque ces centrales sont de type hydroélectrique, solaire, éolien, ces sources sont considérées comme renouvelables.

Le problème majeur que rencontre les producteurs d'électricité est le stockage. Il est nécessaire d'assurer à chaque instant d'équilibrage de réseau, en d'autres termes de s'assurer que la production est égale à la consommation. Si l'écart entre production et consommation augmente trop, le réseau subit des perturbations de fréquence et de tension. Les conséquences peuvent aller jusqu'à la déconnexion de certaines branches du réseau. Les évolutions que connaissent l'offre et la demande d'électricité ont rendu leur ajustement beaucoup plus complexe. La Figure (1.2) illustre cette non-concordance de l'offre éolienne (en bleu) et de la demande (en rose) mesurées à un poste source.



FIGURE 1.1: Intégration de nouveaux modes de production d'électricité dans les réseaux électriques (source :Institute for Energy and Transport)

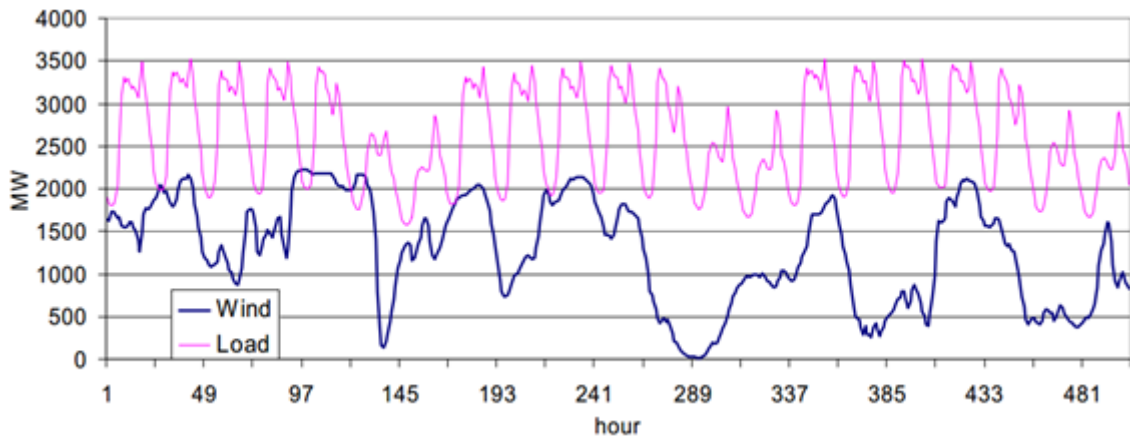


FIGURE 1.2: Comparaison entre l'offre éolienne et la demande [1]

L'insertion massive des énergies renouvelables dans les réseaux électriques n'est pas facile. Afin de faciliter leur intégration, il est indispensable de disposer de sources flexibles capables de réduire l'écart entre l'offre et la demande. Ainsi, l'interconnexion de petites productions, indépendantes et de technologies très différentes présente un vaste champ de recherche : contrôle/commande, électronique de puissance, recherche de point optimal (MPPT : Maximum Power Point Tracking), tenue aux défauts, réglage de fréquence, etc ... La problématique de la gestion de la puissance est l'une de ces thématiques de recherche et de développement qui peut se révéler déterminante pour favoriser techniquement et économiquement ces nouveaux modes de génération de la puissance. Parmi ces différentes sources d'énergies, on peut citer l'énergie éoliennes, l'énergie photovoltaïques. A cause de la variabilité de ces ressources, voire de leurs non disponibilité, il est intéressant, pour améliorer la continuité de la fourniture en

puissance, de les associer à des sources de stockage et/ou des sources classiques (diesel, etc...) ou émergentes (micro-turbine à gaz, etc ...). La mise en place d'un superviseur qui coordonne toutes ces sources est nécessaire pour assurer un bon fonctionnement du système multi-sources. Afin d'étudier le comportement de ces systèmes de production, des modèles reposant sur les lois fondamentales de la physique doivent être développés. Il est alors intéressant d'utiliser ces modèles comme base pour l'optimisation de la gestion de la puissance. En outre, une des problématiques qui entrave l'intégration massive des ressources renouvelables dans les réseaux est leur caractère aléatoire et leurs prévisibilités limitées [2].

Des méthodologies innovantes de gestion qui considèrent tous ces aspects sont nécessaires. De nombreux opérateurs considèrent encore les ressources renouvelables comme des charges négatives, explicitement la puissance d'origine renouvelable est considérée comme une perturbation qui s'ajoutera à la charge, ce qui est tout à fait acceptable dans le cas de faibles pénétrations de ces ressources renouvelables. Or, l'union Européenne a pour ambition d'accélérer sensiblement la croissance de l'énergie renouvelable et propose d'intégrer dans sa palette énergétique une part de 20% de sources d'énergie renouvelables d'ici 2020. A l'horizon 2050, le projet DESERTEC vise à produire 15% de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire [3].

1.1 Intérêt de l'hybridation des sources (Systèmes multi-sources)

1.1.1 Composition d'une centrale multi-sources

Les réseaux de transport et de distribution commencent à s'ouvrir à des producteurs indépendants, mettant en œuvre des centrales généralement hybrides, moins coûteuses et plus efficaces. Un système hybride regroupe l'ensemble des alimentations électriques assurées par le couplage de deux sources (ou plus) de natures différentes. L'hybridation des sources permet de réduire l'utilisation de la source principale, ou de fournir un complément de puissance, et de stocker le surplus de la puissance. Les éléments de stockage facilitent le développement de cette hybridation mais leur conception n'est pas facile et leur durée de vie est faible, notamment pour les batteries. L'hybridation permet ainsi [4] :

1. de minimiser les perturbations et lisser la puissance,

2. d'augmenter la fiabilité
3. de réduire la taille du stockage,
4. de réduire les coûts de production.

Ce sont les raisons pour lesquelles les systèmes électriques sont de plus en plus ou souvent alimentés par une source d'énergie principale (panneaux photovoltaïques, éoliennes, groupes électrogènes.) hybridée par une ou plusieurs sources auxiliaires [5, 6, 7, 8]. Cela est tout particulièrement le cas des systèmes en partie ou totalement autonomes vis-à-vis du réseau de distribution. On parle alors d'un système multi-sources. Par contre les principaux inconvénients d'un tel système est la complexité, le choix difficile de ses sous-systèmes et la difficulté à gérer le niveau de la puissance. Afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné (vent, solaire), une combinaison hybride de deux ou plusieurs technologies différentes avec un système de stockage ou des unités de générations classiques peut améliorer la performance du système. Par exemple, les panneaux photovoltaïques et les éoliennes sont complémentaires pour une zone donnée (site venté en hiver, et ensoleillé en été). En général, les systèmes multi-sources transforment toutes les sources primaires (fuel, vent, rayonnement solaire) en une seule forme d'énergie (électrique) et/ou stockent cette énergie sous une autre forme (chimique, air comprimé, volant d'inertie, etc...). Afin d'accroître la fiabilité des systèmes multi-sources, le choix de la technologie et le dimensionnement sont deux facteurs essentiels qui permettent d'améliorer les performances globales [9].

Ainsi, leur dimensionnement doit permettre d'améliorer les performances, tout en limitant le nombre d'éléments. Aussi, leur gestion doit avoir un contrôle de leur état de fonctionnement interne comme l'état de charge pour veiller à ne pas dégrader leur durée de vie et éviter tout accident. On se retrouve alors dans un cas précis où la gestion de la puissance et le dimensionnement sont étroitement liés et doivent être traités conjointement.

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, la nécessité de protéger l'environnement et de réduire la dépendance aux énergies fossiles a poussé de nombreux pays à changer leur politique concernant la production d'électricité. L'arrivée à maturation de plusieurs nouvelles technologies va favoriser ce changement. Ces technologies comprennent la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables, comme le vent, le photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, les vagues océaniques et les marées, ainsi que les sources « propres », c'est-à-dire dont la répercussion est moindre sur l'environnement comparativement aux sources de produc-

tion classiques. On peut citer les micro-turbines à gaz et les piles à combustible. Elles peuvent être considérées comme renouvelables si le combustible lui-même utilisé est renouvelable (cas de la micro-turbine) où l'hydrogène est produit à partir d'une source renouvelable (cas de la pile à combustible). Bien qu'elles soient polluantes, les groupes Diesel sont encore couramment utilisés, même pour des gammes de puissance relativement élevées, en particulier dans les régions isolées et les systèmes autonomes. Les groupes Diesel sont bon marché et ont un rendement relativement bon et peuvent avoir un impact moins nocif sur l'environnement si elles sont alimentées par un bio-carburant.

D'un point de vue économique, l'hybridation des sources permet de satisfaire une charge locale sans être contraint à construire de nouvelles lignes de transport d'électricité [10]. Les éléments du système hybride peuvent être installés en un délai très court, dans n'importe quel endroit. Cependant, certaines sources renouvelables qui peuvent faire partie du système hybride telles que les panneaux solaires et les éoliennes peuvent requérir certaines conditions (site bien venté, ensoleillement, etc ...). Dans les systèmes autonomes isolés, les systèmes hybrides peuvent être plus économiques. Hybrider les sources peut avoir un impact positif sur la durée de vie des éléments qui le constituent et réduire la consommation de fuel ou de tout autre combustible. D'un point de vue opérationnel, plusieurs travaux ont montré les effets bénéfiques des systèmes multi-sources sur le profil de la tension et les problèmes de la qualité de puissance[11].

La Figure (1.3) montre une liste non exhaustive des éléments qui peuvent être intégrés dans un système hybride. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux cellules qui comportent à la fois des technologies émergentes et volatiles, des générateurs traditionnels et une unité de stockage de l'énergie. Dans ce qui suit, on décrira succinctement quelques-unes de ces technologies.

1.2 Différents éléments d'une centrale multi-sources

1.2.1 Générateurs à combustion traditionnels (Micro-turbine)

Les micro-turbines peuvent fonctionner au gaz naturel, au propane ou au fuel. Elles sont constituées d'un compresseur, d'une chambre à combustion, d'une turbine et d'un générateur.

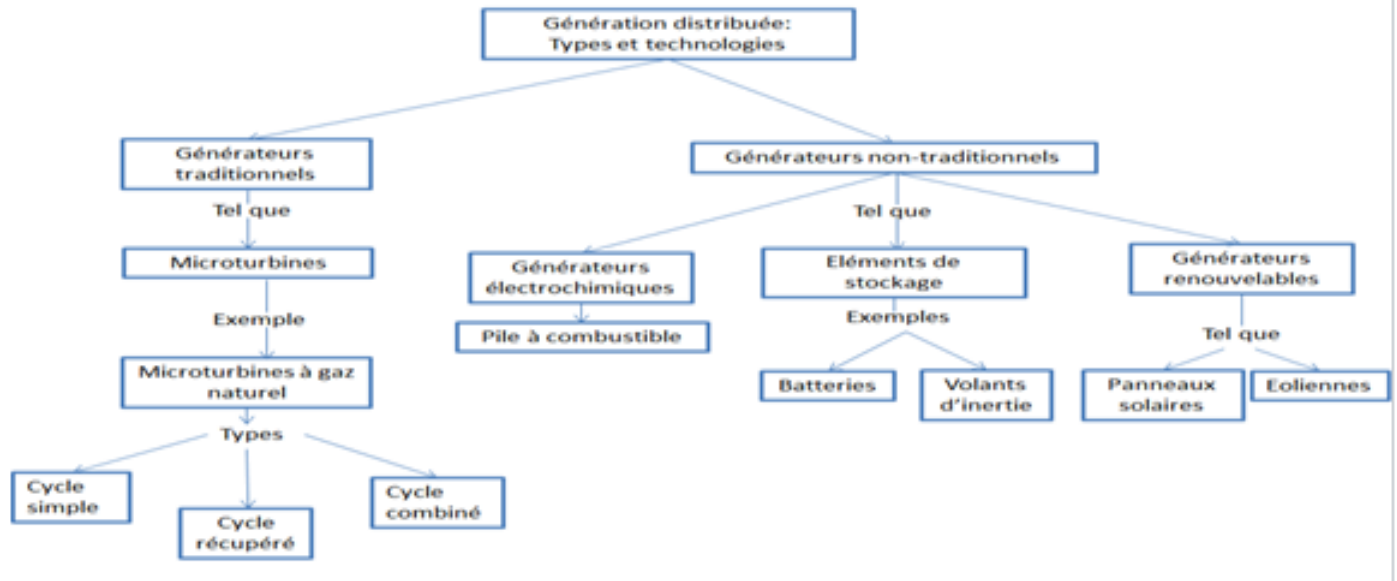


FIGURE 1.3: Exemple des éléments constituant un système hybride

les micro-turbines fonctionnent à des températures et pressions moins élevées et tournent à des vitesses très élevées (100.000 tours/minute). Elles peuvent être installées facilement, ont un bon rendement global (80%), et de très faibles émissions polluantes, notamment en oxyde d'azote.

En outre, les micro-turbines sont connues pour leur dynamique rapide et ont de très bonnes performances concernant la poursuite de la charge. La chaleur produite peut être utilisée pour satisfaire les besoins en chauffage [12]. La figure (1.4) montre les principaux avantages d'une micro-turbine. Les micro-turbines à gaz produisent des gaz de très haute température et pression. Ce gaz est utilisé pour faire tourner l'axe de la micro-turbine qui entraîne le compresseur et l'alternateur.

1.2.2 Éléments de stockage (batterie, super capacité, volant d'inertie.)

Les technologies de stockage stationnaire de l'énergie se déclinent selon cinq catégories :

1. Énergie mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage (STEP),
2. Stockage par air comprimé (CAES), volants d'inertie ;
3. Énergies électrochimique et électrostatique : batteries, condensateurs, super-conducteurs ;
4. Électromagnétique (supercapaciteurs, Supraconducteurs)

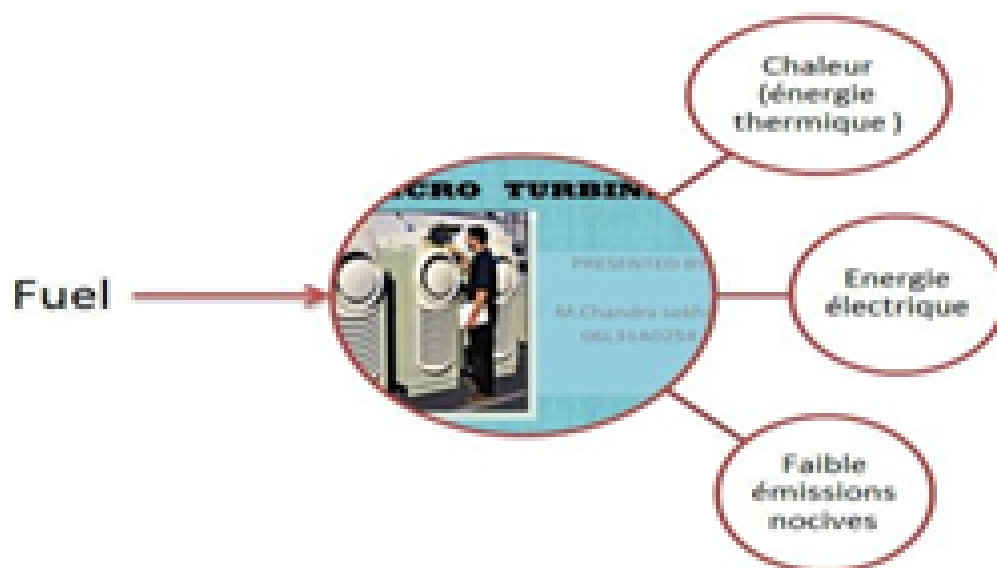


FIGURE 1.4: Avantages de l'utilisation des micro-turbines

5. Énergie thermique et thermochimique : chaleur sensible ou chaleur latente, énergie par absorption ;
6. Énergie chimique : hydrogène, méthanation, P2G etc.

1.3 Générateurs renouvelables

L'épuisement inéluctable des ressources fossiles, associée à une volonté de réduction du taux de réchauffement climatique, conduit naturellement à introduire une diversification de la production électrique reposant sur des générateurs à base d'énergie renouvelable, au côté des groupes électrogènes diesel jusqu'à présent uniquement utilisés dans les micro réseaux. Comparés aux unités de production centralisée (centrale nucléaire, ...), les générateurs à base d'énergie renouvelable sont de très petites puissances en raison du dimensionnement du système de conversion primaire (surface des panneaux photovoltaïque (PV), longueur des pales, ...). Par contre, ce dimensionnement favorise les installations sur un réseau de distribution chez les particuliers et donc en très grand nombre. La croissance de ces filières renouvelables devrait rester très soutenue et ainsi continuer d'augmenter leur part dans la production d'électricité mondiale. En premier lieu, ces technologies ont fait énormément de progrès, que ce soit sur le plan de la fiabilité, ou sur le plan de leur capacité à réduire leurs coûts de production. Ces progrès ont attiré de nouveaux investisseurs intéressés par les perspectives de développement. Ceux-ci ont permis d'augmenter la taille des projets d'énergies renouvelables et donc d'accroître très rapidement le productible de ces filières [14].

1.3.1 Potentiel solaire algérien :

Les générateurs photovoltaïques convertissent une luminosité diffuse en électricité, (GHI) (c'est quoi GHI) alors que les technologies de concentration solaire requièrent un rayonnement direct (DNI). Dans l'état de la technologie actuelle, la technologie de l'énergie solaire thermodynamique (en anglais : CSP pour Concentrating Solar Power) devient envisageable à partir de radiations normales directes (DNI) annuelles de plus de 1900 kWh/m²/an, alors qu'un seuil de 1500 kWh/m²/an en GHI est nécessaire pour les PV. Une Superficie de 1,422,344 km² est susceptible d'être utilisée pour les technologies CSP, CPV et PV soit 60% de l'Algérie dont 6000 km² utilisable uniquement pour la technologie PV[14].

Le potentiel solaire est estimé à [14] :

1. Solaire Thermique : 169 440 TWH/an
2. Solaire Photovoltaïque : 13.9 TWH/an

Les moyennes d'ensoleillement par jour au sud sont de l'ordre de 9-10 heures / jour, avec

un rayonnement global quotidien moyen de 5 à 7 kWh/m²/jour dans la plupart des régions du pays.

1.3.2 Potentiel éolien algérien :

Des microclimats favorables existent sur :

1. les sites côtiers : d'Oran, Bejaia, et Annaba,[14]
2. les Hauts Plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au Sud.[14]
3. la région du Sud est caractérisée des vitesses de vents plus élevées qui dépassent 6 m/s dans la région d'Adrar.[14]

L'Algérie profite de vents modérés avec une vitesse moyenne comprise entre 2 et 6m/sec, particulièrement idéale pour le pompage hydraulique. Le potentiel éolien est estimé à 35 TWh/an avec 1 TWh/an sur la région Côtière (3%), 4,5 TWh/an Haut plateau (12%) et 29,5 TWh/an au Sahara (85%) [14].

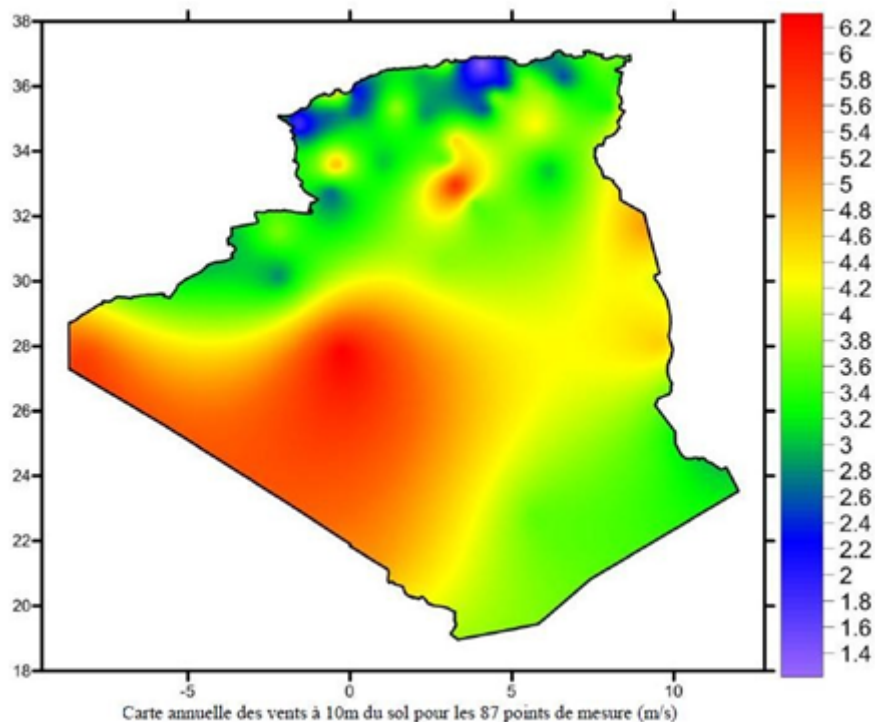


FIGURE 1.5: Répartition géographique du potentiel éolien algérien [14]

Nous remarquons que les vitesses moyennes annuelles varient sur l'ensemble du territoire entre 1.2 et 6.3 m/s. La région de Adrar garde sa suprématie en terme de vitesse du vent

avec $6.3 m/s$. La région de Hassi-R'Mel lui succède avec une vitesse moyenne annuelle égale à $6.1 m/s$. Le site de Tindouf prend la troisième place avec une vitesse qui avoisine les $6.0 m/s$. La majorité des grandes vitesses moyennes annuelles se situent au Sud du pays, comprenant aussi les régions de In-Salah, de Bordj-Badji-Mokhtar à l'extrême sud du Sahara et de Timimoun avec des vitesses comprises entre 4.9 et $5.8 m/s$. La région de In-Amenas au sud ouest du pays avec une vitesse de $4.5 m/s$. Notons par contre la présence du site de Méchria à l'ouest des Hauts-Plateaux qui comprend une vitesse moyenne annuelle voisine de $5.0 m/s$. Il apparaît clairement que le sud du pays est plus venté que les Hauts-Plateaux, eux-mêmes plus ventés que le nord du pays[14].

1.3.3 Potentiel biomasse / Recyclage des Déchets

1.3.3.1 Quantité des déchets

Avec une quantité de déchets annuelle de 438 kg/hab/an le citoyen algérien devance de peu le citoyen Japonais et produit autant qu'un citoyen d'un pays développé [14]. En se basant sur les projections de certaines études, le seuil de 13.5 millions de tonnes de déchets solides urbains sont dépassé en 2014 pour l'ensemble du pays [14]. 72% des Déchets sont de nature organique et donc biodégradables ce qui a pour effet l'émission de méthane CH_4 , qui est un gaz à effet de serre. La capture et la combustion du CH_4 peut réduire son impact d'un facteur 25 ou bien son utilisation comme combustible et réinjecté dans le réseau CH_4 à travers un processus de méthanisation.

1.4 Gestion de la puissance dans les systèmes hybrides :

Les énergies renouvelables posent des difficultés de gestion aux opérateurs de systèmes électriques à cause de leur caractère aléatoire et intermittent. Le problème s'aggrave d'autant plus lorsque le niveau de pénétration des énergies renouvelables est important sur le réseau électrique. Les unités de production d'énergies renouvelables doivent respecter un certain nombre de contraintes techniques liées au fonctionnement des systèmes électriques pour être connectées au réseau. Certaines contraintes vont être redéfinies en tenant compte des spécificités liées à l'énergie renouvelable. Pour cela, une solution est d'utiliser en même temps d'autres moyens

de production d'énergie (hors énergies renouvelables) avec un problème majeur de la gestion optimale de l'énergie. Dans un futur proche, le gestionnaire de réseau devra disposer d'outils de prédiction des productions éoliennes et photovoltaïques. A terme, la prévision de la production électrique pourra être un outil décisionnel pour les producteurs et le gestionnaire de réseau, que ce soit dans le cas des systèmes insulaires ou dans le cas général des marchés de gros électriques). Pour les petits réseaux insulaires, la prédiction de production intermittente sera couplée avec des systèmes de stockage. De plus, une réduction de l'intermittence et de la variabilité de la production pourra être assurée par une multiplication de sources éloignées, procédé appelé foisonnement géographique. Ainsi, le stockage, le foisonnement et la prédiction des énergies intermittentes devraient permettre une meilleure intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Leur prévision permettra de prévoir les réserves énergétiques qui prendront le relais pour préserver la sécurité du système.

1.5 Supervision multi-niveaux des centrales multi-sources

La subdivision de la supervision en plusieurs niveaux est due principalement à trois éléments : l'existence de fortes incertitudes, les caractéristiques des moyens de production et les contraintes du fonctionnement du réseau. Un contrôle au plus près du temps réel est nécessaire, car les prévisions sont moins incertaines. En outre, les contraintes techniques des centrales de production ne permettent pas de répondre rapidement à la demande, d'où la nécessité de prédire les variables, avec un horizon plus ou moins long, en fonction de la dynamique de la centrale de production. Ces caractéristiques des moyens de production (centrale nucléaire, thermique...) obligent les acteurs du réseau à résoudre des calculs d'optimisation, sur une période assez longue afin de pouvoir prendre en considération les dynamiques nécessaires. Enfin, les contraintes imposées par le gestionnaire du réseau doivent être respectées en temps réel. Le problème majeur de l'ensemble des acteurs du système électrique et plus particulièrement de l'exploitant est de maintenir l'équilibre entre l'offre disponible et la demande. Pour satisfaire cet objectif, quatre types d'actions sont réalisés à différents horizons : Niveau 3 (années), Niveau 2 (1 jour à plusieurs jours), Niveau 1 (10 à 15 minutes), Niveau 0 (très près du temps réel) [4]. Bien que ces niveaux soient interdépendants, leur séparation est principalement faite afin de réduire les efforts de calcul du problème.

On doit remarquer que le problème de la coordination optimale des moyens de réglage d'un

réseau pour assurer un critère de qualité en régime permanent est souvent appelé répartition des flux de puissance optimale (en anglais Optimal Power Flow (OPF)) [15]. Il s'agit d'un processus d'optimisation, centré autour d'une fonction objective à minimiser. Le flux de puissance optimale s'appuie sur un calcul de répartition des charges, ou Load Flow en anglais, pour connaître l'état électrique du réseau. Ce terme OPF avait été choisi dans les années 1970 pour désigner les optimisations à buts économiques (Unit Commitment, Economic Dispatch, . . .) pour le dispatching (répartition des consignes de production), c'est-à-dire l'équilibre production-consommation aux pertes près et à moindre coût. De nos jours, on désigne par le terme OPF, tout processus d'optimisation lié à la gestion des réseaux (reconfiguration, diminution des pertes, dispatching économique entre autres). La Figure (1.6) montre les opérations ayant lieu en fonction de l'horizon de prédiction. Les détails des opérations réalisées dans chaque niveau sont décrits dans la suite.

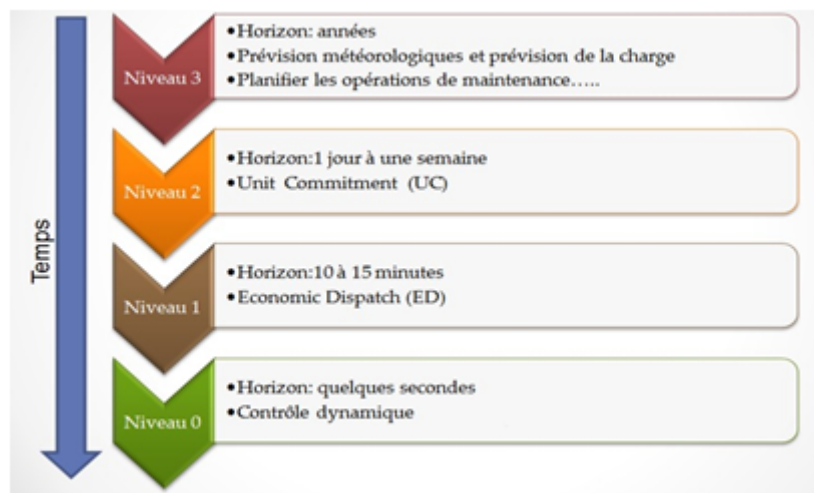


FIGURE 1.6: Gestion de l'énergie d'un système hybride, sur plusieurs niveaux selon l'échelle de temps.

1.5.1 Supervision à moyen terme et long terme

1.5.1.1 Niveau 3 (horizon : une année à plusieurs années)

Ce niveau concerne les horizons longs terme voire très long terme. Les prévisions à très long terme permettent de connaître les investissements à réaliser au niveau des moyens de production et de transport. Il s'agit donc de planifier dans le but de mettre en évidence les besoins en investissement du système électrique production-transport. Dans le cas d'une cellule

multi-sources, la supervision pluriannuelle prévoit la production de chaque élément en fonction des cycles annuels de demande et des programmes de maintenance [16].

1.5.1.2 Niveau 2 (horizon : 1 jour à une semaine)

A un horizon proche, de la veille du jour donné par exemple, il s'agit de prévoir tout d'abord les dates de mise en service des ouvrages, puis les besoins en combustibles, les consignations des ouvrages pour maintenance et le plan de charge pour les groupes. Toutes ces opérations reposent sur des prévisions de consommation et éventuellement de la production renouvelable, affinées au fur et à mesure qu'on se rapproche du jour donné. Le système de pilotage, visant l'optimisation du fonctionnement du micro-réseau du point de vue technique, économique ou écologique, s'exerce au niveau supérieur, sur la base des informations disponibles (état du réseau, disponibilité des générateurs, prévisions de consommation, tarifs en vigueur, etc.) et détermine le programme de génération des prochaines heures.

1.5.2 Supervision à court terme :

1.5.2.1 Niveau 1 (Horizon : 10 à 15 minutes)

Lorsque l'on s'approche du temps réel, les prévisions des charges et des ressources sont mises à jour et la supervision moyen-terme (niveau 2) permettra de fournir les puissances de référence aux éléments constituant le système multi-sources, tout en maximisant et en diminuant la fluctuation de la puissance fournie au réseau. A ce niveau, les moyens de production à dynamique rapide (exemples : batterie, volant d'inertie, etc. . . .) sont utilisés car ils sont très rapidement exploitables. Le nom usuellement donné à ce problème est : Economic Dispatch Problem (ED Problem) ou problème de dispatching économique. L'objectif de base d'un dispatching économique (ED) est la génération et l'exploitation à coût minimal de l'énergie électrique dans un réseau en satisfaisant toute la demande avec les contraintes d'égalité et d'inégalité du système.

Une des limitations du dispatching économique est l'aspect statique du problème. En effet, quand on résout un dispatching économique, on le fait pour une demande à un instant précis. Lorsque le problème prend une dimension dynamique, c'est-à-dire lorsque la demande évolue dans un intervalle de temps donné (une journée par exemple), il faut alors tenir compte des états des centrales ainsi que des changements d'état qui occasionnent des coûts supplémentaires.

1.5.2.2 Niveau 0 (très près du temps réel)

La commande de niveau inférieur (niveau 0) est le contrôle local de tension et de courant de chaque générateur (via un convertisseur de puissance, ou non). Ces contrôleurs réalisent en tout instant la régulation, afin de générer les puissances active et réactive souhaitées. Ces contrôleurs locaux permettent de fournir la puissance de référence avec une certaine dynamique.

Il existe une autre problématique de gestion de la puissance dans les réseaux électriques qui concerne la déviation de la fréquence. En d'autres termes, la cellule multi-sources est connectée à un réseau assez puissant pour imposer sa fréquence (50 Hz). Le réseau peut ainsi compenser les décalages entre la puissance demandée et la puissance produite dans le cas où la cellule n'est pas capable de satisfaire totalement la charge.

La déviation de la fréquence indique qu'il y a un déséquilibre entre la puissance générée et la puissance demandée par la charge. Afin de maintenir la fréquence dans une plage de variation acceptable, la génération doit être ajustée en temps réel pour répondre aux écarts entre les valeurs actuelles et valeurs prédites. Dans des conditions de fonctionnement normales, la fréquence est étroitement maintenue dans une bande étroite autour de la fréquence nominale. Dans le cas d'une perte de ligne par exemple suite à un défaut, la fréquence doit être maintenue au-dessus d'un seuil de fréquence prédéterminé. Si cette valeur seuil est dépassée, le système de protection va déconnecter une grande partie de la génération et le consommateur est affecté.

Il existe deux types de régulation de fréquence dans les réseaux électriques : un contrôle primaire individuel de chaque unité de production et un contrôle secondaire qui consiste à contrôler les zones de production [17]. Un contrôle primaire de la fréquence est très rapide et il est destiné à compenser les déséquilibres entre la génération et la charge. Il est implémenté en utilisant des régulateurs de vitesse dans les centrales de production conventionnelles (thermique, hydraulique..). Ces contrôleurs permettent d'ajuster la sortie en puissance des générateurs, en réponse à une déviation de la fréquence. Le délai pour un contrôle primaire de fréquence est entre quelques secondes à une minute. Le contrôle secondaire (LFC : load-frequency control ou AGC : automatic generation control) est réalisé par un régulateur centralisé situé au centre de conduite de la zone de réglage et dont le rôle est de modifier automatiquement le programme de production des centrales jusqu'à annuler l'écart de réglage de la zone.

sectionSupervision dynamique d'une centrale multi-sources On rappelle qu'une centrale multi-sources est constituée de plusieurs éléments contrôlables ou non (en particulier non tota-

lement contrôlables pour un certain nombre de sources d'énergies renouvelables), et de caractéristiques dynamiques souvent très différentes, et que ces sources doivent contribuer à un niveau de puissance spécifié, par exemple dans les niveaux 1 et 2. Les parties précédentes montrent qu'il existe un vide entre le niveau 1, qui répartit les puissances de manière statique (Economic Dispatch) sans tenir compte des variations non maîtrisables du niveau de puissance de certaines sources, ni des dynamiques respectives de ces sources, et d'autre part des commandes locales de chacun des éléments contrôlables (Niveau 0). La supervision dynamique s'inscrit comme une génération de trajectoires de référence pour chacun des contrôleurs locaux, tenant compte d'une part des ordres donnés aux niveaux 2 ou 1, et d'autre part de la dynamique en boucle fermée de chacun des éléments de la centrale. Notre étage de supervision peut être inséré entre le niveau 1 et 0. Cela est justifié par le fait que les prédictions de 10 à 15 minutes sont peu précises, notamment en ce qui concerne la production de la puissance solaire dont les dynamiques de variation sont très rapides pendant les journées marquées par des passages très fréquents de nuages.

A ce titre, le problème de pilotage optimal de système multi-sources se rapprocherait d'un problème classique de calcul de plan de production optimal des centrales d'un réseau (Unit Commitment), ramené à une très petite échelle. On peut en effet négliger l'influence du réseau, les pertes étant ramenées en rendement de production des générateurs, et le superviseur devant décider des plans d'arrêt et de démarrage sur la période des générateurs contrôlables. Cependant, suivre cette approche comme un problème d'engagement des unités (Unit Commitment) nécessiterait une masse d'informations exhaustive en termes de courbes de coûts, de puissance appelée, de taux de disponibilité, etc. En outre, les prévisions sur 24 heures des charges et des ressources renouvelables sont généralement très grossières. Les algorithmes de conduite existant tels que l'engagement des unités (Unit Commitment) et le dispatching économique (Economic Dispatch) ne sont donc pas adaptables à notre problématique et ne permettent pas d'intégrer les dynamiques des éléments de la cellule multi-sources et de tenir compte efficacement des prédictions. Notons qu'un contrôle de fréquence (Load Follow) n'est pas nécessaire dans le cas d'un système multi-sources connecté au réseau. En d'autres termes, le réseau peut échanger de la puissance avec le système hybride et compenser les décalages éventuels. Chaque élément de la cellule multi-sources possède son propre contrôleur (contrôleur MPPT, régulateur PI, \dots) et les sources sont parfaitement contrôlées (Niveau 0) [4].

1.6 État de l'art des techniques de supervision des systèmes multi- sources

La gestion énergétique fait l'objet depuis quelques années de nombreuses publications, notamment dans le domaine des systèmes multi-sources [18]. Son objectif est de générer les références des différentes boucles de commande de manière à respecter les objectifs du cahier des charges et en vérifier toutes les contraintes. Afin de trouver une solution optimale, la connaissance préalable du profil de la charge et éventuellement des ressources renouvelables est exigée. Les contraintes imposées par le dimensionnement des éléments du système doivent être respectées et une attention supplémentaire doit être portée sur l'état de charge et la sollicitation des éléments de stockage, s'ils font partie du système hybride. Le défi majeur de cet objectif est notamment le fait que la puissance demandée par la charge aux ressources renouvelables ne peuvent pas être connues à l'avance. Donc le superviseur doit ainsi répondre à une sollicitation instantanée de puissance sans connaissance préalable du futur profil de la demande en puissance. Dans ce qui suit on va dresser une liste non exhaustive des méthodes de supervision classées selon deux critères [4] :

1. méthodes de supervisions nécessitant ou non un modèle du système,
2. méthode de supervision selon l'approche utilisée (optimisation, séquentiel,etc.).

1.6.1 Méthodes de supervision avec ou sans modèle :

Les fonctions de contrôle d'un système hybride peuvent être divisées en deux catégories, à savoir les contrôleurs locaux et le système de supervision, comme indiqué sur la figure (1.7). Les contrôleurs locaux permettent au système global de fonctionner correctement en respectant les consignes. Ils peuvent être subdivisés en deux sous-catégories :

1. contrôle séquentiel type on/off (exemple : connecter ou déconnecter un élément),
2. régulateur PID ou autre, qui permettra d'assurer le contrôle des grandeurs asservies, qui peuvent être, par exemple, l'optimisation de la puissance extraite du dispositif (dispositif MPPT : Maximum Power Point Tracking), le contrôle des grandeurs électriques (consignes puissance active-réactive ou fréquence-tension, par exemple), de grandeurs mécaniques, etc.

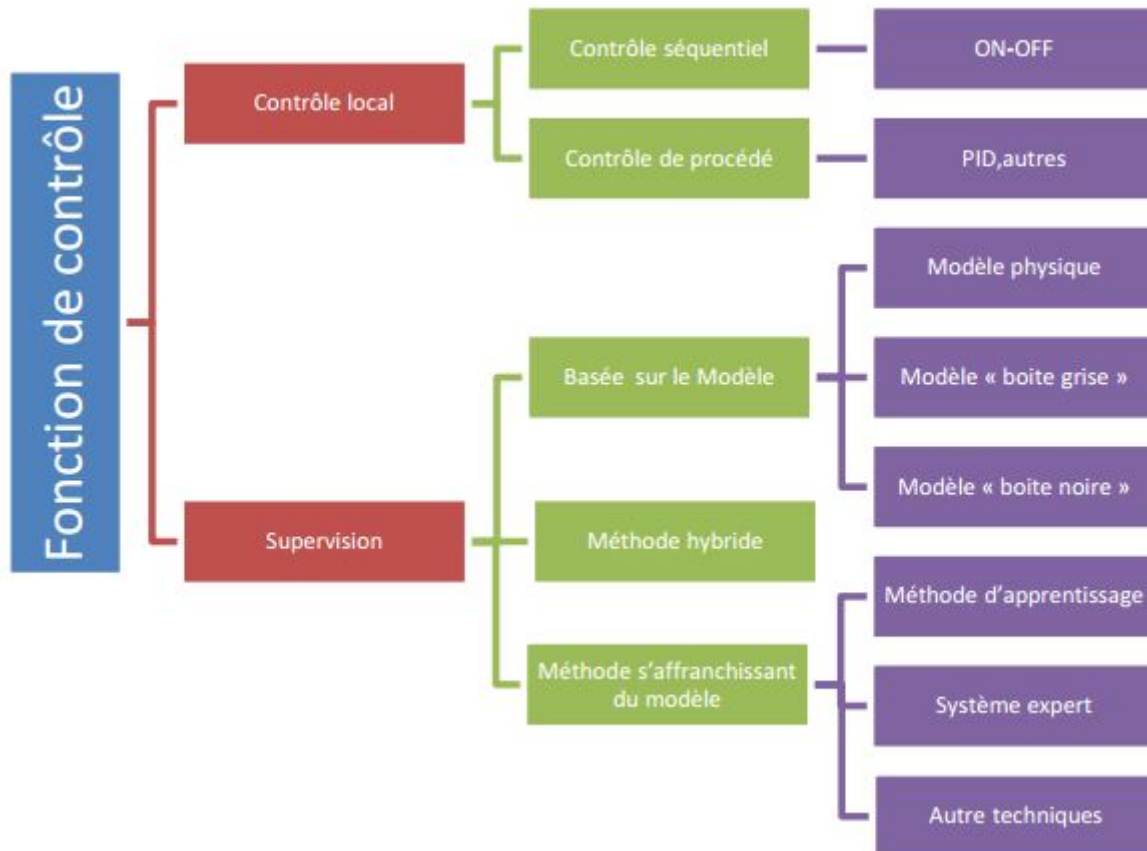


FIGURE 1.7: Schéma de classification des fonctions de contrôles dans les systèmes hybrides

Le système de supervision vise principalement à satisfaire la charge, en tenant compte de plusieurs paramètres du système hybride. Contrairement à la commande locale, le système de supervision ne doit être conçu qu'après une compréhension des caractéristiques du système global, les interactions éventuelles entre les sous-systèmes et leurs variables associées. La connaissance de ces caractéristiques peut être utilisée pour minimiser une fonction « objectif », ce qui va conduire à l'amélioration de la performance du système. Comme indiqué sur la figure (1.7), les stratégies de supervision peuvent être classées en trois groupes : des méthodes basées sur un modèle dynamique, des méthodes s'affranchissant du modèle et des méthodes hybrides.

1.6.1.1 Méthode « sans » modèle

Ce type de méthodes ne nécessite pas la connaissance du modèle du système ciblé. Les systèmes experts et les méthodes d'apprentissage peuvent être utilisés pour concevoir ce type de superviseur. Un système expert peut imiter le raisonnement humain pour prendre des décisions pour un point de fonctionnement donné en se basant sur une base de connaissance. Il a également

la possibilité de déduire des solutions raisonnables même lorsque les données sont incomplètes. Un système expert peut être facilement implémenté, toutefois il est affecté par la richesse de sa base de données et en dehors de son domaine d'expertise, il peut induire des erreurs significatives. Les méthodes d'apprentissage ne nécessitent pas non plus la connaissance du modèle mathématique du système. Elles décrivent un paradigme d'apprentissage dans lequel le système tente d'améliorer son comportement par rapport à des actions précédentes. Ces méthodes peuvent trouver une solution optimale ou quasi-optimale. Cependant, elles demandent un temps considérable pour « apprendre » au contrôleur. Ces méthodes sont très sensibles aux paramètres d'apprentissage ; c'est la raison pour laquelle il est difficile de les implémenter en pratique.

1.6.1.2 Méthodes à base de modèles

La connaissance du modèle permet de prédire la réponse du système afin d'adapter les paramètres du contrôle. Le rôle principal de l'optimisation consiste à minimiser l'énergie à l'entrée du système tout en ayant des performances acceptables. A chaque pas d'échantillonnage, une technique d'optimisation est appliquée au système afin de minimiser une fonction coût et d'évaluer les variables de commande. Les commandes réagissent rapidement au changement des conditions externes au système. Selon le modèle utilisé, la méthode de supervision à base de modèle peut être divisée en trois sous catégories : méthode de supervision basée sur un modèle physique, modèle boîte « grise » et modèle boîte « noire ».

1.6.1.3 Modèles physiques

Ils sont construits à partir d'une analyse physique, chimique, ... en appliquant les lois générales, fondées sur des principes (lois de mécanique, électromagnétisme, bilan des flux) qui régissent la dynamique au sein des processus étudiés. Ces modèles ne comportent pas généralement de paramètres ajustables, ou des paramètres ajustables en très petit nombre. En pratique, il est toujours souhaitable d'établir un modèle de connaissance des processus que l'on étudie. Néanmoins, il arrive fréquemment que le processus soit trop complexe, ou que les phénomènes qui le régissent soient très mal connus, pour qu'il soit possible d'établir un modèle de connaissance suffisamment précis pour l'application considérée. On est alors amené à concevoir des modèles purement empiriques, fondés exclusivement sur les résultats de mesures effectuées sur

le processus. En général, ces modèles détaillés ou simplifiés ont des performances relativement élevées concernant les prédictions de leurs comportements futurs. Néanmoins, un modèle très détaillé peut entraver son application en temps réel.

1.6.1.4 Modèle « boîte grise »

Lorsque des connaissances exprimables sous forme d'équations sont disponibles mais insuffisantes pour concevoir un modèle de connaissance satisfaisant, on peut avoir recours à une modélisation « boîte grise » (ou modélisation semi physique) qui prend en considération à la fois les connaissances et les mesures. Un tel modèle peut concilier les avantages de l'intelligibilité d'un modèle de connaissance avec la souplesse d'un modèle comportant des paramètres ajustables.

1.6.1.5 Modèle « boîte noire »

Les modèles « boîte noire » sont construits essentiellement sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus à modéliser. La modélisation consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les entrées et les sorties, des équations (algébriques, différentielles.) paramétrées, et à estimer les paramètres à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables. Ils sont développés sur la base des comportements empiriques du système. Les paramètres du modèle n'ont pas généralement de signification physique. En règle générale, ces modèles ne nécessitent pas la connaissance détaillée du système, cependant ils ne sont précis que sur un intervalle bien déterminé. En dehors de cette plage, les extrapolations peuvent induire des erreurs significatives.

1.6.1.6 Méthode hybride

Différents types de méthodes peuvent être utilisés simultanément pour concevoir un superviseur. Par exemple, certaines méthodes hybrides peuvent utiliser l'approche basée sur le modèle, et l'approche sans modèle. Le superviseur ainsi formulé peut avoir des performances élevées.

1.7 Méthodes de supervision classées selon l'approche

Suivant que la supervision se fasse en ligne ou hors ligne (pour obtenir un dimensionnement préalable par exemple), les outils de gestion énergétique peuvent se différencier en deux catégories, soit en suivant des règles (à partir d'éléments déterministes ou de logique floue), soit à l'aide d'outils d'optimisation. Cette différenciation est représentée sur la figure (1.8).

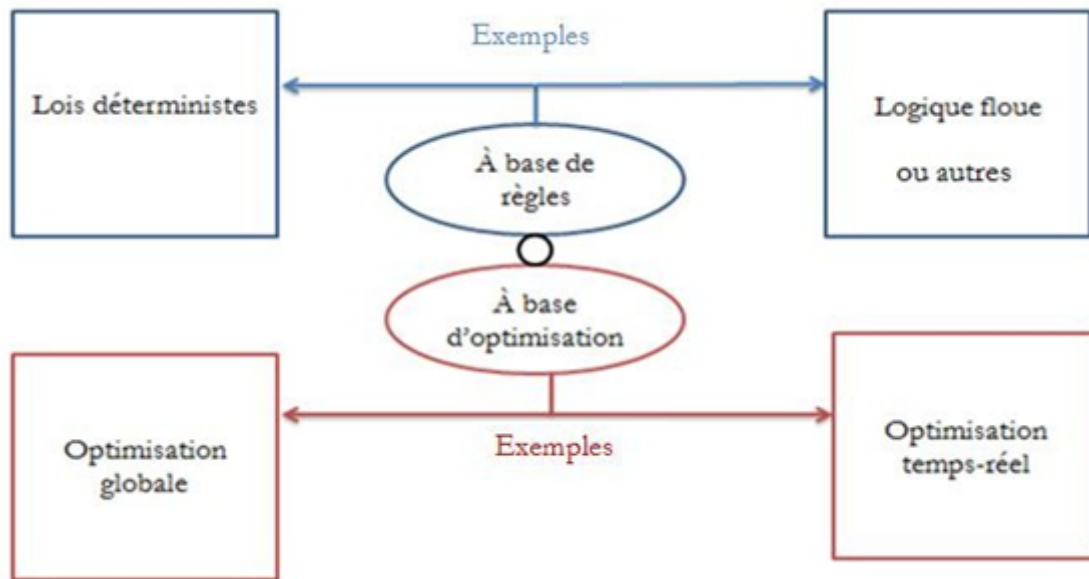


FIGURE 1.8: Classification de stratégies de supervision des systèmes multi-sources.

1.7.1 Stratégies de supervision basées sur des règles

La façon la plus commune de mettre en œuvre un superviseur pour les systèmes multi-sources consiste à introduire un ensemble de règles, qui tient compte de certains paramètres significatifs et décide de la répartition de la puissance entre les différents éléments de la cellule. Contrairement aux techniques basées sur les méthodes d'optimisation, la supervision basée sur des règles n'utilise pas une description formelle du problème ([19, 20, 21]). Ces règles proviennent de l'intuition de l'ingénieur : l'objectif qualitatif est d'extraire le maximum de puissance d'origine renouvelable et faire en sorte que les éléments fonctionnent à leur rendement maximal. Les paramètres du contrôleur à base de règles (par exemple les valeurs des seuils qui décident quand passer d'un mode à un autre) sont généralement obtenus par l'étalonnage basé sur la modélisation et la simulation de la chaîne de puissance, éventuellement en utilisant des techniques d'optimisation. Le principal avantage de contrôle fondé sur des règles est sa simplicité

et la facilité de mise en œuvre sur les systèmes hybrides. Par exemple, si l'état de charge d'une batterie passe en dessous d'une certaine valeur, la source principale devra fournir une puissance supplémentaire pour la recharger.

Les règles peuvent être complexes et détaillées en fonction des performances désirées. Les principaux inconvénients sont l'absence de preuve de l'optimalité, et le fait qu'il n'y a pas de méthode standard pour la synthèse des règles (par exemple, les règles sont décidées au cas par cas, mais il n'est pas possible de déterminer a priori qu'un ensemble de règles donné soit approprié pour une application précise). En outre, la présence de seuils et de paramètres rend le calibrage (qui pourra permettre d'avoir une large plage de conduite), assez difficile. Néanmoins, cette stratégie est largement utilisée dans les systèmes hybrides et éventuellement en conjonction avec d'autres algorithmes basés sur l'optimisation.

Un autre moyen de concevoir un superviseur est la logique floue [22]. Elle permet d'étendre la notion de logique classique, associée aux variables booléennes ne prenant que deux valeurs 0 et 1. Il est alors possible d'associer à des variables des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant des valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$ et quantifiant une possibilité. Citons par exemple la méthode de pilotage flou d'un système hybride photovoltaïque/éolien, avec batteries de puissance limitée. Le système de gestion d'énergie pilote la puissance de sortie du générateur hybride éolien / photovoltaïque et l'état de charge des batteries, qui sont comparés à la puissance demandée pour appliquer les règles d'inférence floue. Chaque éolienne peut être alors déconnectée en cas de dépassement de la production par rapport à la charge, sans possibilité de stockage, et, de même, pour chaque module PV, ce qui assure un suivi de charge grossier.

1.7.2 Techniques globales d'optimisation

Les techniques d'optimisation globales telles que traitées dans la littérature, se placent généralement dans la perspective de dimensionnement d'une installation en tenant compte d'un scénario sur le long terme, d'une stratégie de supervision donnée (basée sur les règles, optimisations, . . .), de coûts d'investissement, d'un profil de charge et éventuellement d'un profil de la production d'une source renouvelable. La résolution d'un tel problème permet de déterminer la répartition idéale des types de sources (éoliennes, panneaux solaires, batteries, génératrice diesel, . . .), qui minimise le retour sur investissement. Compte tenu du manque de connaissances

et des incertitudes de plusieurs paramètres, tels que l'évolution des prix du fuel, les conditions tarifaires de l'énergie, et cela sur plusieurs années. Cette approche ne peut conduire qu'à des résultats triviaux, puisqu'on suppose que tous les paramètres sont connus. La supervision des systèmes hybrides est un domaine de recherche fécond et constitue un des grands défis dans le domaine des systèmes hybrides et des micro-réseaux. Bien qu'il existe de nombreuses stratégies efficaces pour la supervision des systèmes multi-sources, l'épuisement des ressources fossiles, ont poussé les acteurs du réseau électrique à accorder plus d'attention au contrôle optimal et à la supervision robuste. Comme le montre l'évolution de la production des articles scientifiques durant les 20 dernières années (figure (1.9)), des efforts ont été entrepris pour élaborer des stratégies de supervision optimale pour les systèmes multi-sources.

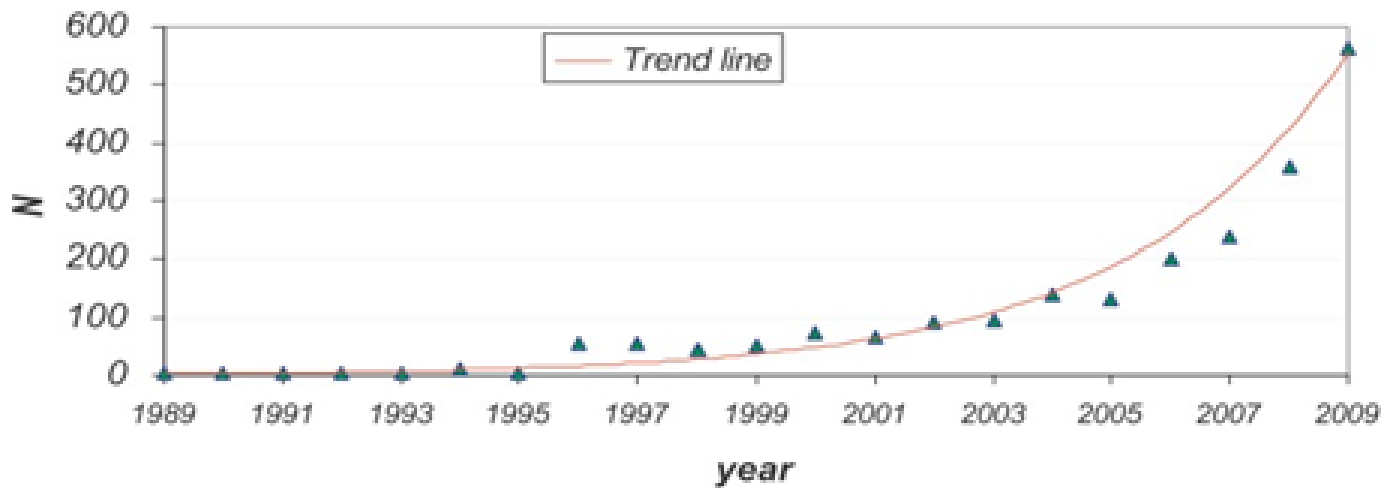


FIGURE 1.9: Nombre d'articles publiés utilisant les techniques d'optimisation appliquées aux énergies renouvelables [18].

Les algorithmes de supervision à base d'optimisation globale, auxquels on soumet une fonction objectif et des contraintes peuvent être totalement différents. Le choix de l'algorithme intègre la connaissance de la grandeur à optimiser et des grandeurs de commande qui influent sur les grandeurs à optimiser. La fonction objective et les grandeurs de commande peuvent être continues ou discrètes [15]. Elles peuvent avoir des degrés de non linéarité plus ou moins élevés (linéaire, quadratique...) et le système peut être contraint ou non contraint. Dans le cas où l'on connaît préalablement le profil de puissance de la charge et des ressources renouvelables, une approche globale d'optimisation peut être entreprise en se fondant sur la théorie générale de la commande optimale [23]. Si la proportion de la pénétration des énergies renouvelables est importante, les incertitudes sur le niveau de puissance non maîtrisé peuvent prendre une ampleur qui peut toutefois être rédhibitoire pour l'application de ce type de méthodes. Ces ap-

proches sont incomplètes et ne permettent pas de proposer une réponse applicable telle quelle en temps réel. Cette étape sert ainsi le plus souvent de référence pour évaluer la performance de la stratégie réellement employée, qui doit nécessairement couvrir tous les aspects : anticipatif et optimisé. Ainsi, l'exploitation des prédictions court terme devrait permettre d'avoir un gain appréciable par rapport à une technique dans laquelle les paramètres exogènes sont parfaitement connus, car les prédictions à court terme sont plus précises. Dans ce qui suit on détaillera les apports d'une telle approche.

1.7.3 Commande prédictive

La commande prédictive fait partie de la classe des commandes optimales. La théorie moderne du contrôle optimal a commencé dans la deuxième moitié du XXe siècle [24]. La commande prédictive est largement utilisée dans le domaine industriel pour contrôler le comportement des processus complexes. Ce type de méthode s'appuie sur le modèle du processus pour déterminer par anticipation, en utilisant la connaissance de l'évolution future de la consigne, la valeur optimale des entrées de commande à appliquer, au sens d'un critère de performance préalablement défini qui caractérise le but que l'on souhaite atteindre (régulation, poursuite, ou tout autre critère de qualité). L'un des avantages de la commande prédictive est la prise en compte des contraintes imposées au système dès la phase de conception. En outre, le système peut prendre en compte les variations futures de la consigne et des perturbations, si celles-ci sont mesurées ou prédites. Ce type de commande est donc particulièrement adapté aux systèmes multi-sources dont la consigne future peut être programmée ou prédite (évolution de la charge, du rayonnement solaire dans le cas des panneaux photovoltaïques, etc...)

La commande MPC (Model Predictive Control) est appliquée dans les systèmes de puissance [25], mais aussi dans les systèmes à énergies renouvelables. Cette méthode a été inventée par le français J. Richalet en 1978 et généralisée par D. W. Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux états unis d'amérique et en europe (Shell et Adersa). Par exemple, les auteurs des articles [26] et [27] ont proposé une commande MPC afin de contrôler dynamiquement une éolienne, une stratégie de contrôle d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation à base de la commande prédictive a été étudiée. L'objectif est de réduire la fatigue du système de transmission tout en maximisant la puissance extraite. Les résultats obtenus sont meilleurs comparativement au cas d'un régulateur classique.

La commande prédictive [28] peut être utilisée comme contrôleur local mais aussi comme un superviseur. Elle est appliquée dans plusieurs types de système de gestion d'énergie comme une commande pilotant des systèmes en boucle fermée.

1.8 Pilotage optimal des systèmes de chauffage dans le secteur du bâtiment

Dans l'article [29], les auteurs proposent une commande prédictive afin de superviser la gestion d'énergie dans un bâtiment résidentiel. Le système peut produire simultanément de la puissance et de la chaleur. La fonction coût a été conçue afin de minimiser le coût de l'énergie. Elle tient compte de la consommation du fuel, du prix d'achat et de vente de l'énergie au réseau. L'objectif principal de la commande des systèmes thermiques dans le bâtiment s'exprime sous forme d'un problème d'optimisation : minimiser la consommation (ou le coût) tout en garantissant le niveau de confort (thermique) désiré. Cet objectif semble l'argument suffisant pour l'utilisation de la commande prédictive dans ce cas. Pourtant, le coût élevé de la technologie nécessaire à l'implantation et surtout la difficulté d'obtention d'un modèle mathématique satisfaisant ont longtemps pénalisé l'utilisation des commandes optimales (prédictives) dans la gestion énergétique des bâtiments. Notons que ces systèmes sont caractérisés par des dynamiques lentes.

1.9 Gestion de la puissance dans les véhicules hybrides

Les auteurs de [30] examinent la possibilité d'appliquer la commande prédictive à un véhicule électrique parallèle hybride. On suppose que la vitesse du véhicule est constante et un GPS est utilisé afin d'estimer la pente de la route durant l'horizon de prédiction. Ainsi le couple des roues requis durant l'horizon de prédiction est estimé et le résultat de commande optimale est obtenue en minimisant la fonction coût, qui introduit la consommation de carburant durant l'horizon de prédiction. La demande en puissance future est supposée parfaitement connue sur un horizon long, ce qui n'est pas réaliste. Les auteurs présentent une application de supervision par commande prédictive pour contrôler un véhicule hybride [31]. L'algorithme utilise le modèle de la pile à combustible pour prédire sa réponse dynamique et ainsi envoyer la référence de

puissance nécessaire à la batterie afin de satisfaire la demande avec une dynamique satisfaisante. Les objectifs affichés sont la minimisation de l'utilisation de l'hydrogène et le maintien de l'état de charge de la batterie autour d'une valeur nominale. La fonction coût est la somme de trois termes : La différence entre l'état de charge et la référence, le coût d'utilisation de l'hydrogène, et la différence entre la puissance fournie et la puissance de référence.

1.10 Systèmes multi-sources de production d'électricité à base d'énergies renouvelables

Les contraintes de l'utilisation de la commande MPC dans les systèmes multi-sources sont très différentes, par rapport au cas de la gestion d'énergie dans les bâtiments ou dans le véhicule hybride. Par exemple, la gestion du chauffage dans le secteur tertiaire est caractérisée par des dynamiques très lentes à cause de l'inertie du bâtiment, et les constantes de temps atteignant plusieurs dizaines de minutes. Dans le cas des véhicules hybrides, la charge doit être satisfaite à chaque instant (pas de plage d'erreur possible) et la structure n'est pas très compliquée (au plus trois sources différentes). C'est la caractéristique principale des systèmes hybrides dédiés aux applications portables. Une caractéristique commune réside dans l'influence importante et la variabilité des conditions extérieures (température, parcours du véhicule, ou ensoleillement ...) [2].

Dans le cas des systèmes multi-sources dédiés à la production d'électricité, les contraintes environnementales et économiques obligent les producteurs à intégrer de plus en plus d'énergies renouvelables dans leur parc de production. Cependant, pour favoriser leur intégration, il est indispensable de disposer d'installations flexibles capables d'ajuster la production à la demande provenant du réseau. Cela passe par une optimisation du procédé mais également du contrôle commande. Parmi les technologies privilégiées, on peut citer les panneaux photovoltaïques et les éoliennes. Compte tenu de leurs caractères aléatoires et intermittents, les contraintes de pilotage d'une cellule sont plus importantes. Actuellement, le pilotage d'une cellule contenant de telles sources ne prend en compte que la puissance fournie instantanée. Aujourd'hui, plusieurs opérateurs modélisent encore les systèmes PV (Panneaux Photovoltaïques) et la production éolienne comme des charges négatives qu'ils intègrent donc comme des perturbations dans l'algorithme de pilotage de la cellule hybride.

Afin d'améliorer la disponibilité et la manœuvrabilité d'une installation comprenant plusieurs sources renouvelables il est intéressant d'y associer des systèmes de stockage ou/et des sources de production utilisant des sources fossiles. En revanche, l'insertion des éléments de stockage et des sources de production à base de combustible (gaz) complique la gestion du flux dans les systèmes multi-sources (gestion de l'état de charge, vieillissement, rendement . . .) Des méthodologies innovantes de gestion des systèmes multi-sources qui considèrent tous ces facteurs sont nécessaires.

Cependant, l'environnement des centrales multi-sources étant très variant (ensoleillement, vent, besoin de production, . . .) il est important de prendre en compte une estimation de ces variations. Une approche de type commande prédictive permet de prendre en compte explicitement les variations futures des variables exogènes.

En réalité, chacun des éléments possède déjà un contrôleur local qui est souvent standard et pré-réglé. La commande prédictive va donc être comme un superviseur, c'est-à-dire qu'elle va fournir les références de puissance de chaque élément. Ce niveau de supervision va calculer ces références par la résolution d'un problème d'optimisation à horizon glissant.

L'objectif principal est de fournir une puissance requise par le gestionnaire de réseau. Comme la cellule est constituée de plusieurs éléments, il existe un nombre important de degrés de liberté, qui peuvent servir à satisfaire des services à moindre coût. La fonction objectif de la commande prédictive doit inclure non seulement des considérations de coût et de performance, mais aussi des considérations liées à la durée de vie des éléments de stockage.

La commande prédictive semble donc être un outil adapté au pilotage d'une cellule multi-sources, mais il faut trouver une architecture et un réglage qui puisse permettre de proposer un superviseur facilement reconfigurable et réglable.

Afin de tenir compte des incertitudes une erreur de 10% sur les prédictions (24h) des ressources renouvelables a été ajoutée. Cependant, les méthodes de prévision statistique, notamment pour des horizons élevés, appliquées à la gestion des systèmes multi-sources sont quant à elles souvent confrontées à de grandes erreurs de prédiction en cas de fluctuations rapides du rayonnement solaire ou du vent [32]. Aujourd'hui, les utilisateurs tels que les exploitants de fermes éoliennes, les gestionnaires de réseaux de distribution ou de transport, les compagnies d'électricité, très demandeurs d'outils de prédiction car ils reconnaissent que c'est le seul moyen économique permettant de gérer l'intermittence des ressources renouvelables.

A ce jour, à notre connaissance, aucune application réelle de la commande prédictive n'a été réalisée pour la supervision. Néanmoins, une commande MPC utilisée comme contrôleur local a été implémenté avec succès [33], afin de commander une pile à combustible (PàC). Ils l'ont appliqué également comme un contrôleur local dans le but de contrôler la vitesse d'un moteur à combustion, en trouvant un compromis entre la consommation du fuel et les émissions polluantes.

1.11 Conclusion

Il a été question dans ce chapitre de d'introduire le lecteur au domaine très vaste des systèmes multi-sources, nous avons montré l'intérêt de l'hybridation des sources. La problématique de pilotage optimal concerne plusieurs niveaux de supervision, sur des périodes de temps les plus longues (heures, journée, semaine) aux plus faibles (un quart d'heure). Cependant, les solutions existantes comme les algorithmes de conduite de réseau tels que Unit Commitment et Economic Dispatch. L'état de l'art a été réalisé en élargissant la problématique à la gestion énergétique de systèmes hybrides d'autres applications (transport, secteur du bâtiment, véhicule hybride ...). Les méthodes de supervision peuvent être divisées principalement en deux catégories : Les systèmes experts (logique floue, algorithmes séquentiels, etc ...) et les algorithmes à base d'optimisation. Les méthodes à base d'optimisation se basent sur une approche déterministe, en disposant de l'information parfaite sur les variables exogènes et les caractéristiques du système, et en se ramenant à un problème classique d'optimisation sous contraintes. Toutefois, ces approches sont incomplètes et ne permettent pas de proposer une réponse applicable telle quelle en temps réel. Cette étape sert ainsi le plus souvent de référence pour évaluer la performance de la stratégie réellement employée, qui doit nécessairement couvrir tous les aspects : prédictions à très court terme, minimisation du coût, etc ...

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et configurations des systèmes multi-sources (PV, Éolien, Diesel), qui seront utilisés comme base pour la conception d'une carte de commande multi-sources, et pour mieux comprendre le cas réel des systèmes hybrides.

Chapitre 2

Configuration des systèmes multi-sources (PV, Éolien, Diesel)

2.1 Introduction

L'Algérie possède un potentiel solaire classé parmi les plus élevés au monde. La durée d'ensoleillement annuel atteint 2000 heures à travers tout le territoire national et 3900 heures au Sahara. L'énergie solaire reçue est estimée à $1,7 \text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au nord, $1,9 \text{ KWh/m}^2/\text{an}$ aux hauts plateaux et $2,65 \text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au Sahara. Le vent est caractérisé par des vitesses modérées (2 à 6 m/s). Dans le sud algérien, l'électricité est fournie à des petits villages par des réseaux isolés alimentés par des générateurs Diesel. Cette source d'énergie électrique a un rendement énergétique faible et est souvent coûteuse à cause des coûts élevés de maintenance et de transport de carburant [14].

La combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelable et non renouvelables (cellule multi-sources) s'impose donc comme une solution fiable au problème de la gestion de la puissance électrique. Ainsi, plusieurs combinaisons de ces générateurs de puissance sont proposés, à savoir : (Solaire photovoltaïque (PV), groupe Diesel), (Éolien, Diesel), (PV, éolien), (PV, éolien, Diesel, réseau), etc \dots . En plus de ces systèmes dits hybrides, il existent des systèmes purement photovoltaïques et des systèmes purement éoliens [14].

Un modèle dynamique d'une cellule multi-sources doit refléter les principales caractéristiques de chaque sous-système de la cellule multi-sources. Aussi, il doit chercher à optimiser l'utilisation

des ressources locales et à minimiser celle des combustibles fossiles afin de réduire au maximum les coûts de fonctionnement en tenant compte de la taille du système. En général, l'énergie photovoltaïque se prêterait mieux aux petites charges tandis que l'énergie éolienne, lorsqu'elle peut être exploitée, serait rentable pour de plus grandes charges. La conception et la mise en œuvre d'un système fiable et efficace exigent une évaluation complète de ressources et une analyse des besoins en énergie. Avant de développer de tels systèmes pour un site spécifique il est important d'étudier la demande en énergie et les ressources disponibles sur ce site [14].

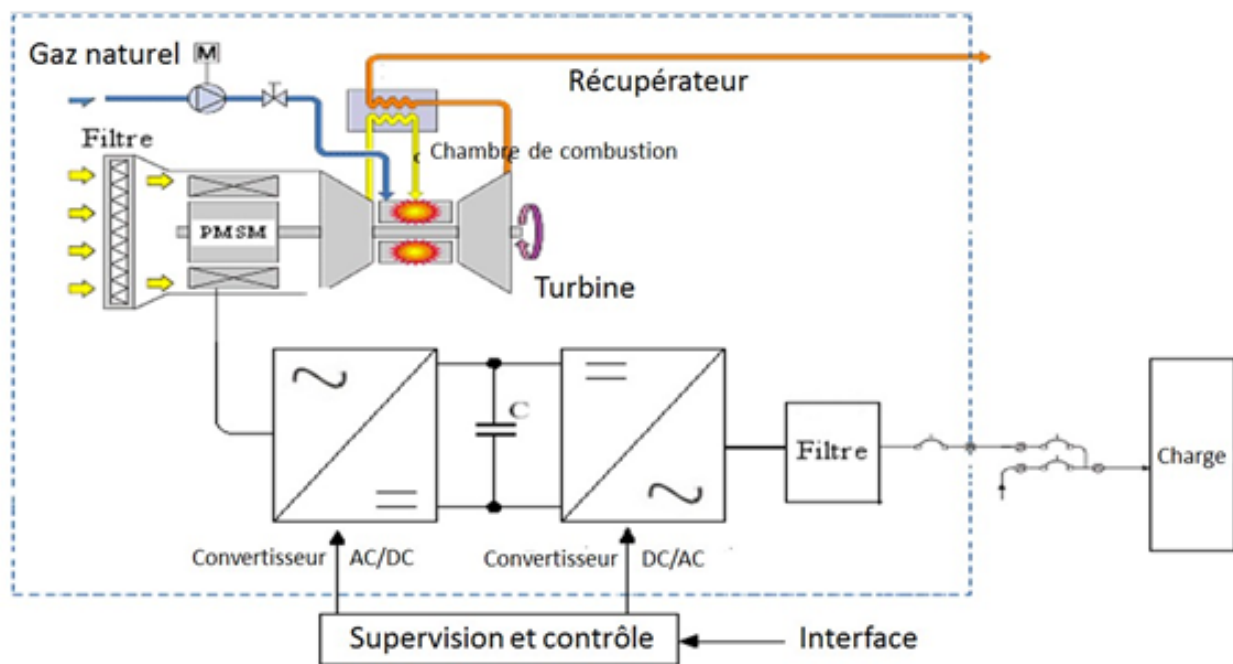


FIGURE 2.1: Schéma d'une micro-turbine [34].

2.2 Composants de la cellule multi-sources

2.2.1 Schéma de la micro-turbine

Les micro-turbines (voir figure (2.1)) jouent un rôle important dans un micro-réseau car elles peuvent produire de l'électricité à de bas coûts et à des degrés d'efficacité supérieurs à ceux des centrales traditionnelles. Les avantages des micro-turbines à gaz n'est pas que financier ; leur développement est stimulé par :

1. un faible coût du capital,
2. préemballées, relativement sans entretien, silencieuses,

3. une diversité d'application,
4. un prix faible du gaz,
5. un rendement élevé (si la cogénération est utilisée),
6. un impact réduit sur l'environnement.

Dernièrement, des convertisseurs électroniques de puissance (AC-DC et DC/AC) ont été utilisés pour la connexion au micro-réseau ce qui donne des possibilités nouvelles de réglage. Ce type de générateur est composé d'une micro-turbine à gaz, d'une machine synchrone à aimants permanents de grande vitesse, d'une mise en cascade de convertisseurs bidirectionnels AC-DC-AC et d'un filtre pour le raccordement sur le réseau.

2.2.2 Caractéristiques des types de batterie du système de stockage

Plusieurs types de batteries se trouvent sur le marché : Les batteries au plomb (Plomb-acide), Nickel-Cadmium (Ni-Cd), Nickel-Zinc (Ni-Zn), Nickel Fer (Fe-Ni), Zn-Chlore (Cl-Zn) et NaS. Plus de 90% des batteries disponibles sur le marché sont de type plomb-acide. Selon les conditions de fonctionnement, il est très important de choisir la batterie la plus appropriée. Les batteries (Ni- Cd), dont le coût est quatre fois plus élevé que celui des batteries au plomb, ont plusieurs avantages par rapport à celles-ci. On peut citer leur possibilité de rester longtemps dans un état de faible charge, la tension fournie beaucoup plus stable et des entretiens plus espacés dans le temps. Les batteries plomb-acide sont toutefois les plus utilisées dans les systèmes hybrides, qui permettent des cycles profonds de charge/décharge (pouvant atteindre 70 à 80%). Le tableau sur la figure (2.2) présente quelques caractéristiques de quelques types de batteries.

2.2.3 Schéma d'un générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est une source de courant continu, et par conséquent sa sortie doit être adaptée pour sa connexion à un réseau alternatif ou pour alimenter une charge AC. On peut y parvenir en deux étapes avec un convertisseur DC /DC et un onduleur DC/AC (Figure (2.3)) ou en une seule étape avec un onduleur DC/AC [35]. Dans les deux cas, les convertisseurs sont contrôlés pour fonctionner autour du point de puissance optimal, c'est-à-dire au point de génération de puissance maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking).

Batteries	Capacité (Wh/Kg)	Puissance maximale W/Kg	Rendement (%)	Durée de vie (cycles)
Plomb-acide	35-50	150-400	>80	500-1000
Nickel/Cadmium	40-60	80-150	75	800
Nickel/Fer	50-60	80-150	75	1500-2000
Nickel/Zinc	55-75	170-260	70	300
Nickel/Métal	70-95	200-300	70	750-1200
Sodium/Sulfure	150-240	230	85	800
lithium/Fer/Sulfite	100-130	150-250	80	1000

FIGURE 2.2: Paramètres des types de batterie [4].

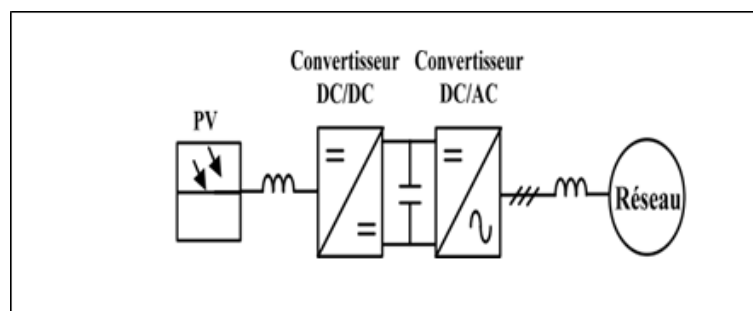


FIGURE 2.3: Schéma d'un générateur photovoltaïque.

2.2.3.1 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur (généralement en silicium). Ces deux couches sont dopées différemment, avec un déficit d'électrons dans la couche p , et un excès d'électrons dans la couche de type n . Les particules de lumière (photons) viennent heurter les électrons sur le silicium et leur communiquent leur énergie (voir figure (2.4)). En présence de lumière, une tension apparaît donc aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à travers une charge, le courant peut circuler. Pour effectuer la collecte de ce courant électrique, des électrodes sont déposées sur chaque couche de semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. La tension générée est peu variable alors que le courant est quasi proportionnel à la lumière reçue. L'intensité maximum du courant produit dépend de la valeur de l'éclairement et de la surface de la cellule photovoltaïque.

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque est donné sur la figure (2.5). Il comprend [36] :

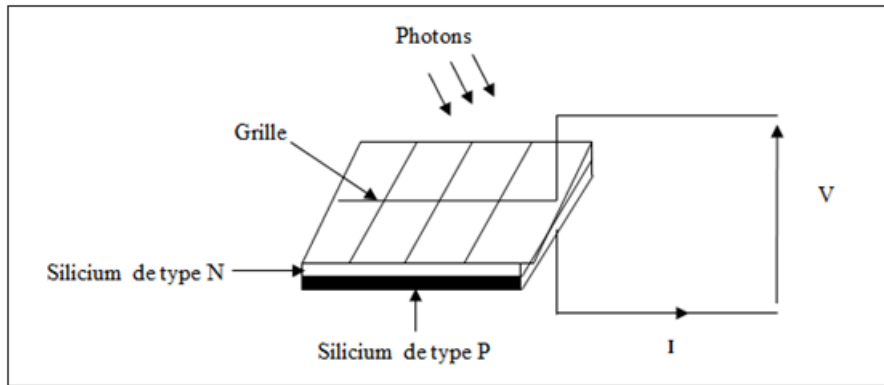


FIGURE 2.4: Modèle d'une cellule élémentaire.

1. une source de courant modélisant le courant photoélectrique
2. une diode en anti- parallèle modélisant la jonction p-n,
3. une résistance en série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexion,
4. une résistance shunt R_{sh} en parallèle avec générateur de courant qui caractérise les divers courants de fuite.

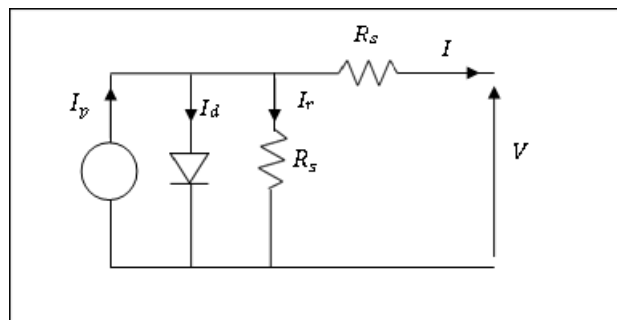


FIGURE 2.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

D'après le schéma équivalent de la figure (2.5) le courant délivré est donné par :

$$I = I_p - I_d - I_r \quad (2.1)$$

avec

- I_p photo-courant de la cellule, proportionnel à l'éclairement solaire
- $I_d = I_0(e^{(q(V+R_s I)/n k_B T)} - 1)$ le courant traversant la diode, avec :
 1. I_0 : courant de saturation inverse de la diode,
 2. q : charge de l'électron $(1,610^{-19}C)$,
 3. k_B : constante de Boltzmann $(1,3810^{-23}J/K)$,

4. n : facteur d'idéalité de la diode (compris entre 1 et 5),

5. T : température de la jonction en Kelvin,

6. V : tension aux bornes de la cellule

— $I_r = (V + R_s I) / R_{sh}$ le courant passant par la résistance R_{sh} .

La figure (2.6) montre une caractéristique courant-tension ($I_c - V_c$) typique pour une cellule photovoltaïque. Ainsi, si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I_c - V_c$ de la cellule avec la courbe de la charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite de pente $1/R$. Par conséquent, si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe. Le courant I_c varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CD. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I_c : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température ([37, 38]).

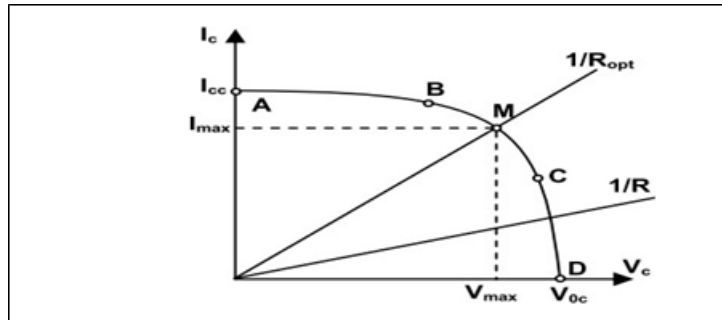


FIGURE 2.6: Caractéristique $I_c=f(V_c)$ d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux :

1. Le courant de court circuit, $I_{cc} = I_{ph}$, est proportionnel à l'éclairement et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit ($V = 0$).
2. La tension à vide V_{co} correspond à la chute de tension sur la diode quand elle est traversée par le photo courant avec un courant nul $I = 0$.

3. Le Point de puissance maximale est le point de fonctionnement $M(V_{max}, I_{max})$ sur la figure (2.6), pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.
4. Le rendement maximal est le rapport entre la puissance électrique maximum produite et la puissance solaire incidente :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{A G_a} \quad (2.2)$$

où P_{in} est la puissance incidente, G_a l'éclairement et A la surface de la cellule.

5. Le facteur de forme (Fill factor) est le rapport entre la puissance délivrée à la charge et le produit de I_{cc} et V_{co} :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} = \frac{I_{max} V_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (2.3)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0,7. Il diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

Sur la figure (2.7) est présentée l'influence de l'éclairement énergétique G_a et de la température T_c de la cellule sur la caractéristique $I_c - V_c$ de la cellule PV [36].

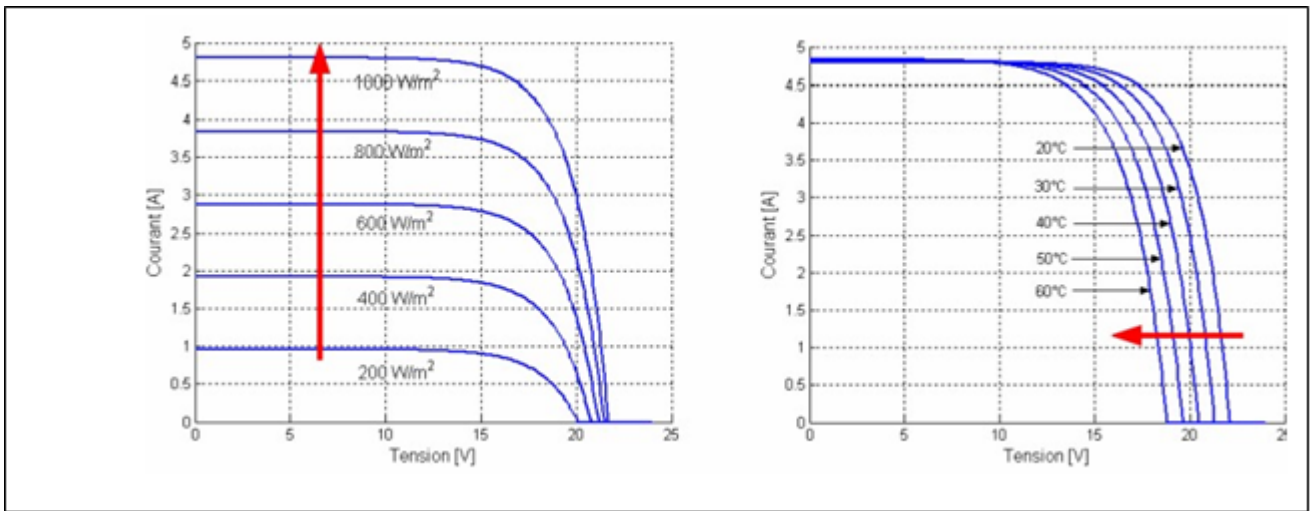


FIGURE 2.7: Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque [38].

L'effet prédominant avec l'augmentation de la température de la cellule est la diminution de la tension de fonctionnement à vide ; la cellule est ainsi moins efficace. Le courant de court-circuit augmente légèrement avec la température de la cellule.

2.2.4 Caractéristiques d'un aérogénérateur

Une éolienne (ou un aérogénérateur) transforme l'énergie cinétique produite par le vent en énergie mécanique afin de produire de l'électricité. A partir de 50 km/h, les aérogénérateurs atteignent leur rendement maximum et au dessus de 90 km/h ils sont arrêtés car ils peuvent devenir incontrôlables. Une distance de 200 à 400 mètres est impérative entre deux éoliennes. Les aérogénérateurs sont autonomes, le fonctionnement est supervisé par un système qui permet de gérer la vitesse du rotor, l'arrêt de l'éolienne en cas de vents trop importants.

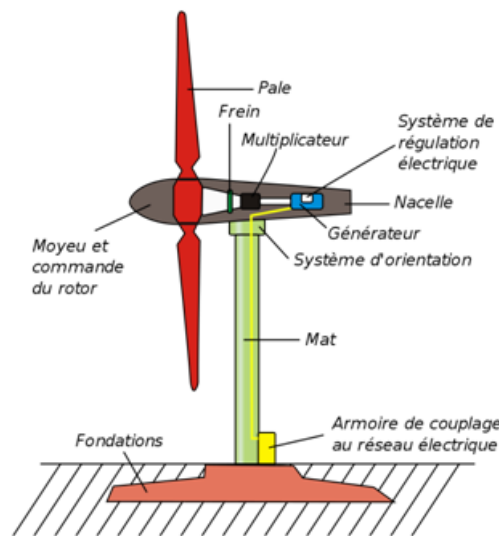


FIGURE 2.8: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur [39].

Sur la figure (2.8) on présente les différents composants d'un éolienne de puissance. En effet, une éolienne de puissance à axe horizontal est composée de :

1. Une nacelle qui supporte :
 - Les pales, le moyeu et le rotor : Captent l'énergie produite par le vent et la transforme en énergie mécanique de rotation.
 - Le frein : Permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesses des vents trop importante (maximum de 90 km/h soit environ 30 tours/minute) qui pourrait l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation du premier rotor.
 - Le multiplicateur : Augmente la vitesse de rotation d'un second rotor (30 tours/minute maximum) avec un système d'engrenages au delà de 1000 tours/minute pour la génératrice électrique.

- La génératrice : Transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- 2 Le système d'orientation : Place la nacelle et donc les pales face au vent.
- 3 Le mat : Place l'éolienne a une certaine distance du sol, selon la configuration du terrain et les vents de ce lieux.
- 4 Armoire de couplage au réseau électrique : Rend compatible l'énergie produite avec celle du réseau.

2.2.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

On considère une masse d'air se déplaçant avec une vitesse V . Si l'énergie cinétique de cette masse peut être entièrement récupérée par un dispositif ayant une surface S , situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée serait :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_{\text{vent}}^3 \quad (2.4)$$

où ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^{-3}).

En réalité cette puissance ne peut être extraite dans sa totalité, en raison de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance, donné par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (2.5)$$

où P_t est la puissance mécanique extraite de la puissance du vent P_v . D'où la relation suivante :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) V_{\text{vent}}^3 \quad (2.6)$$

où λ est le ratio entre la vitesse de vent pour un rayon de pale R sur la vitesse de rotation de la turbine (en anglais : tip speed ratio), Ω_m :

$$\lambda = \frac{R \Omega_m}{V_{\text{vent}}} \quad (2.7)$$

La figure (2.9) montre la variation du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ en fonction de la vitesse de rotation de la turbine Ω_m , pour différents types de turbines. On constate que $C_p(\lambda)$ possède

un point de fonctionnement optimal maximisant sa puissance chaque type d'éolienne. Il ne peut cependant passer au-delà d'une valeur théorique représentant une valeur maximale absolue, la limite de Betz, de 0,59 [38].

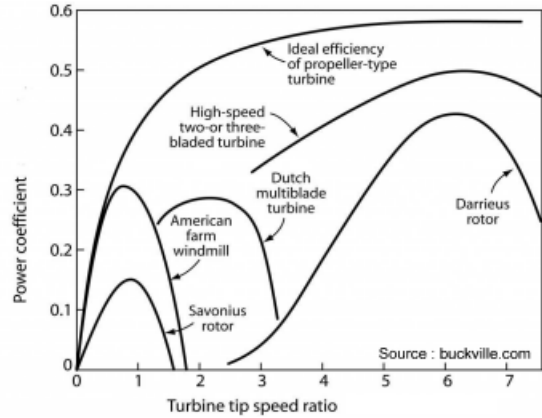


FIGURE 2.9: Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse de rotation de la turbine (tip speed ratio) pour différents types d'éolienne [2].

D'autre part, le couple aérodynamique est exprimé par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho S \frac{C_p(\lambda)}{\Omega_t} V_{\text{vent}}^3 \quad (2.8)$$

2.3 Description d'un système hybride

Le terme système hybride s'applique à tout système de production d'énergie utilisant des sources de natures différentes ; soit une source passive ou renouvelable (hydraulique, éolienne ou solaire) et une source active (générateur thermique). Plus spécifiquement, les systèmes hybrides autonomes visés dans cette étude sont une combinaison des éléments suivants [14] :

1. un champ de panneaux photovoltaïques
2. une ou plusieurs turbines éoliennes
3. une ou plusieurs génératrices
4. un banc de batteries pour stocker l'énergie produite
5. une unité de contrôle de charge de la batterie
6. un onduleur pour adapter l'alimentation DC aux charges AC.
7. une station de contrôle (monitoring) (optionnel) pour mesurer certains paramètres (courant, tension, irradiation, température)

Le principe de fonctionnement d'un système multi-sources est basé sur un phénomène physique : l'effet photovoltaïque, éolien ou hydraulique sont captés puis transformés en électricité respectivement par le panneau photovoltaïque, l'aérogénérateur, la turbine hydroélectrique. Cette énergie est stockée dans les batteries par l'intermédiaire d'un régulateur. Elle peut ensuite être utilisée directement sous forme de courant continu ou sous forme de courant alternatif après transformation par un onduleur et un automate programmable qui gère les transitions entre les différents modes d'exploitation du système . La figure (2.10) présente un schéma global d'un système électrique hybride, pour objectif de réduire la consommation de carburant et assurer une meilleure prise en charge de la demande électrique.

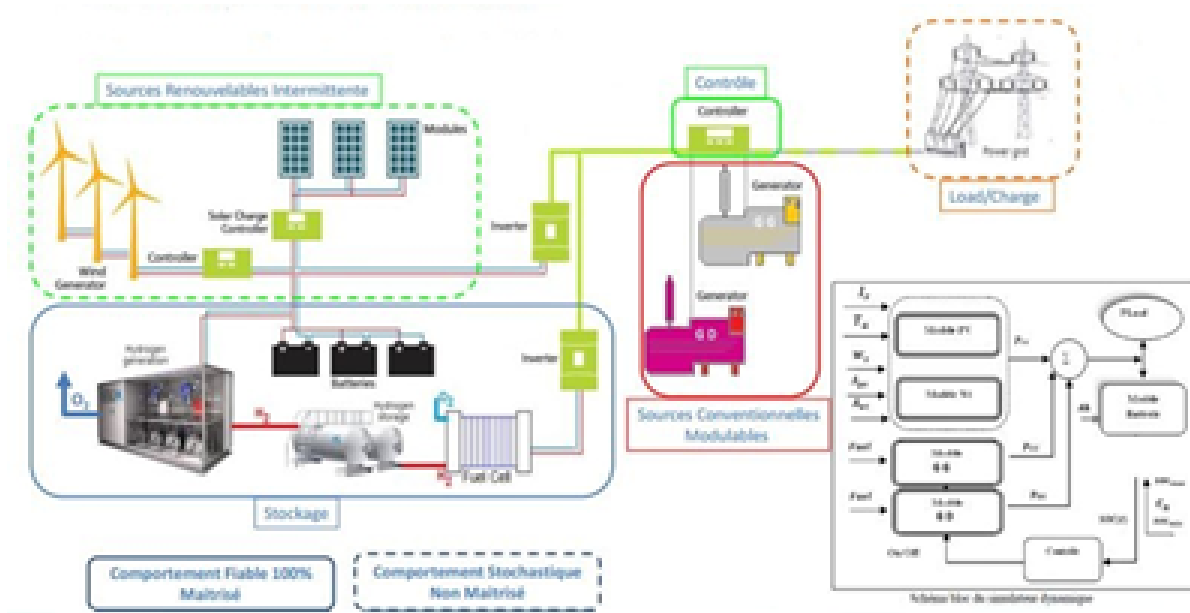


FIGURE 2.10: Schéma global d'un système hybride [14].

La figure (2.11) montre un schéma de connexion des différents composants électroniques d'un système multi-sources (hybride).

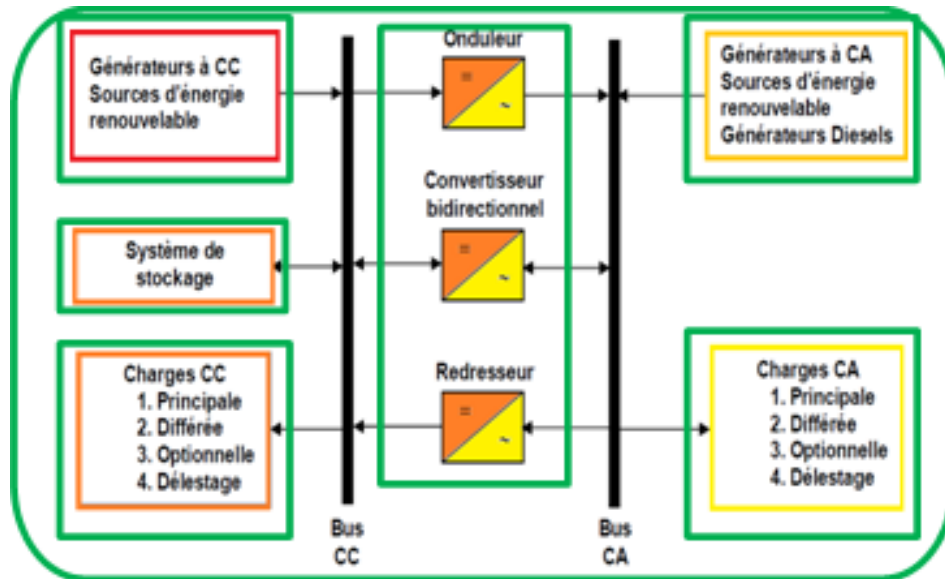


FIGURE 2.11: Architecteur de système électrique hybride.

2.3.1 Généralités sur un système PV

Un générateur PV convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations :

1. non autonomes ou (grid-connected), c'est-à-dire rattachées au réseau de distribution électrique. Dans les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standard de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur -onduleur), lequel est souvent équipé d'un circuit suiveur (MPPT) pour récupérer la puissance maximale. Le surplus d'énergie du générateur PV est injecté au réseau public et les demandes de puissance qui excèdent la capacité de production du générateur PV sont achetées sur le réseau.
2. autonomes ou (stand-alone), qui sont le propos de cette étude. Ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du PV n'est pas toujours suffisante pour satisfaire la demande. L'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. Dans certains cas un backup compensera la différence entre la capacité totale disponible et la demande, tout en chargeant les batteries.

Généralement les batteries sont à l'acide-plomb, et les backup sont des génératrices fonctionnant au diesel ou à l'essence. En pratique ces derniers sont intégrés aux systèmes PV autonomes formant ainsi des installations hybrides.

2.3.2 Système hybride PV/Diesel

Pour les applications hors réseau, il est possible d'avoir un système PV fonctionnant en parallèle avec une génératrice diesel. Les systèmes sont alors complémentaires : le système PV permet de réduire la consommation en combustible fossile et les coûts d'entretien de la génératrice ; l'utilisation de la génératrice permet d'éviter le surdimensionnement du système PV (modules PV et batteries d'accumulateurs) qui serait nécessaire pour répondre à la demande en tout temps. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. Les génératrices peuvent utiliser plusieurs types de combustibles fossiles : essence, mazout (diesel), propane ou gaz naturel.

2.3.3 Catégories de systèmes hybrides PV/Diesel

Les systèmes hybrides de ce type peuvent être catégorisés selon les configurations suivantes [14] :

2.3.3.1 Configuration PV/Diesel série :

Lorsque l'énergie produite par le champ PV et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le groupe diesel est débrayé (voir figure (2.12)). Le transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie diminue le rendement du système. Cette configuration est idéale pour des puissances inférieures ou égales à $5kW_c$.

Les avantages de ce montage sont :

1. Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ;

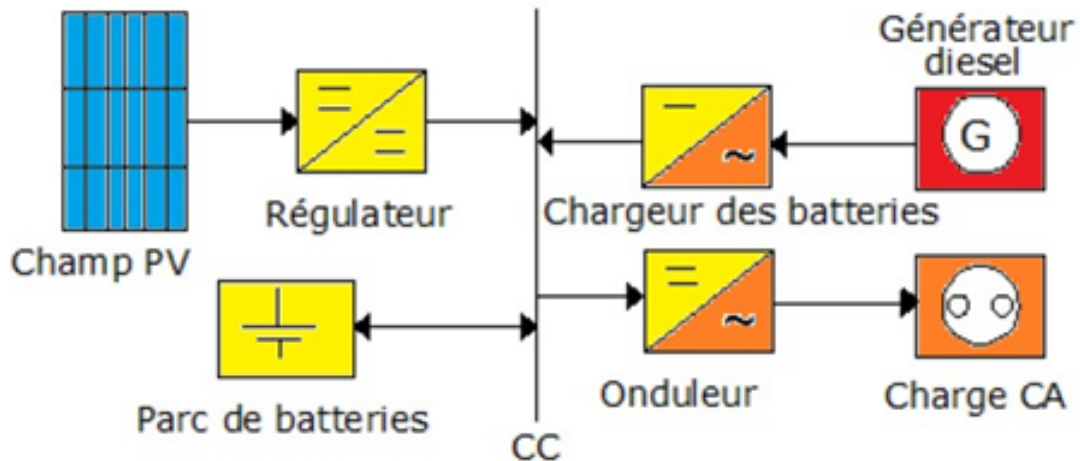


FIGURE 2.12: Système hybride PV/Diesel Série

2. La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée à une interruption de l'alimentation électrique ;
3. Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension dont la forme, l'amplitude et la fréquence sont convenables.
4. Un dimensionnement facile du générateur.

Les inconvénients sont :

1. L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible ;
2. La batterie doit avoir une grande capacité ;
3. 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 ;
4. Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

2.3.3.2 Configuration PV/Diesel commuté

Pour cette configuration, le groupe diesel est arrêté lorsque la demande est faible et qu'elle peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie (voir figure (2.13)). Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation PV et la batterie via l'onduleur, mais le fonctionnement en parallèle est toujours impossible. La batterie peut être chargée par le champ PV et le diesel par l'intermédiaire d'un redresseur. Il n'y a pas

des pertes de conversion significatives liées à la production du générateur diesel (en comparaison à la configuration série). La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique au lieu de la commande manuelle.

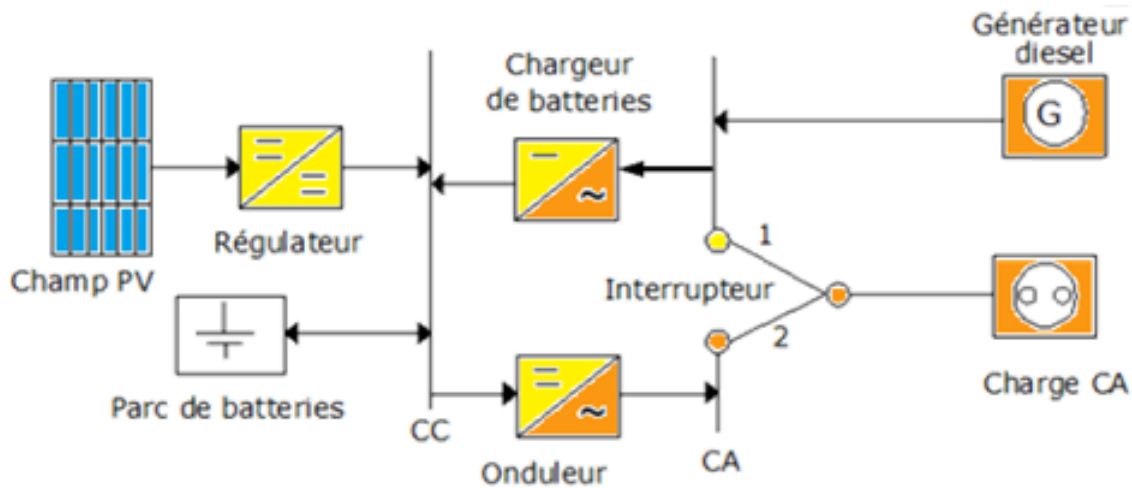


FIGURE 2.13: Système hybride PV/Diesel Commuté

Les avantages de ce montage sont :

1. Le générateur fournit l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement et diminue la consommation du carburant
2. Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel ;
3. L'onduleur fournit au consommateur la tension désirée.

Les inconvénients sont :

1. L'apparition d'une coupure instantanée lors de la commutation des sources ;
2. Le générateur diesel et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système ;
3. Une construction complexe.

2.3.3.3 Configuration PV/Diesel parallèle

Pour cette configuration (voir figure (2.14)), la charge est alimentée par les deux bus simultanément. Toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources. Le générateur diesel

est connecté au bus CA. L'installation PV et la batterie sont liées sur un bus CC. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie, soit comme onduleur quand la charge est satisfaite par les PV et batteries. La synchronisation de l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système.

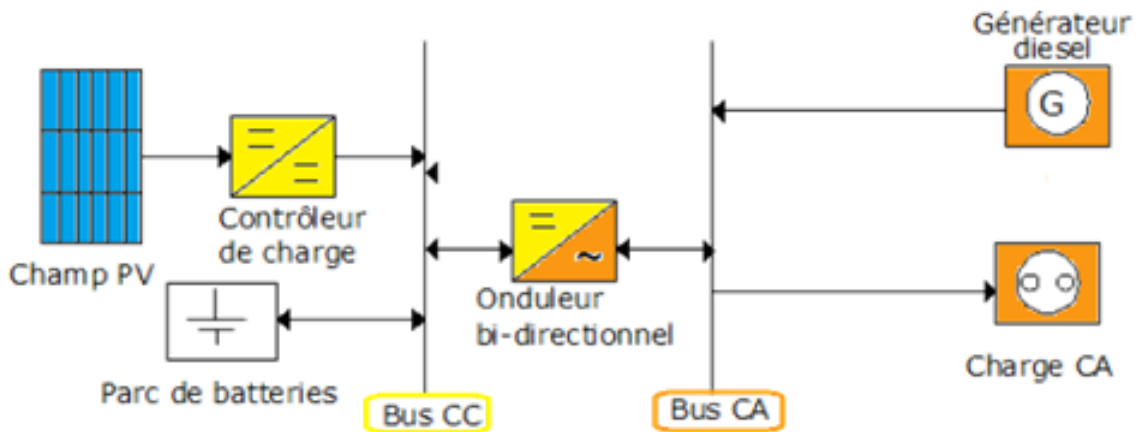


FIGURE 2.14: Système hybride PV/Diesel parallèle.

Les avantages de ce montage sont

1. Les composants des systèmes n'ont pas besoin d'être dimensionnés pour la charge totale ;
2. Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale ;
3. Baisse du nombre des convertisseurs électroniques ;
4. Une avarie du convertisseur ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

Les inconvénients sont :

1. Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;
2. Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible
3. Nécessité d'une personne qualifiée
4. Le bus continu est plus difficile à contrôler

2.3.4 Système Hybride PV/Diesel/Éolien

Les systèmes PV/Diesel peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles que les turbines éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques (voir figure (2.15)). Dans les régions ensoleillées en été avec des vents forts en hiver, les systèmes PV/Éoliens/Diesel permettent d'exploiter en plus l'énergie éolienne pour couvrir une partie des exigences de la charge qui autrement serait alimentée par un groupe diesel.

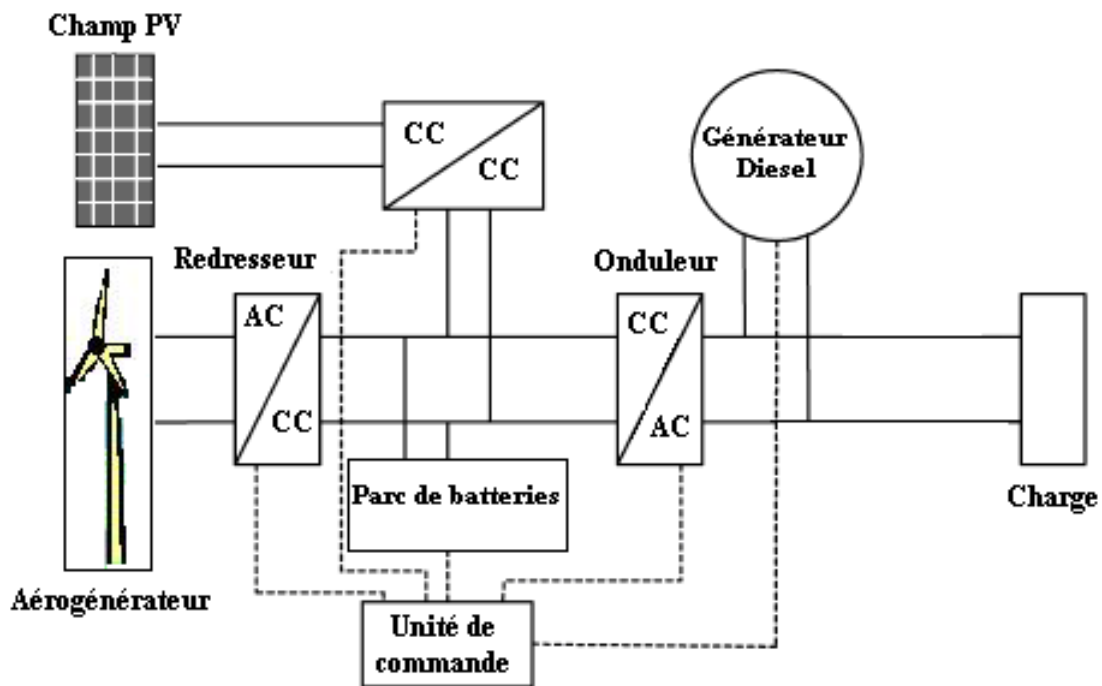


FIGURE 2.15: Schéma d'un système hybride PV/Diesel/éolien.

2.4 Analyse économique d'un système hybride

Toute étude de dimensionnement d'installations photovoltaïque, éolienne ou hybride (photovoltaïque, éolienne et diesel) doit être menée de manière à approcher au mieux la solution optimale du compromis : coût-satisfaction du besoin. Le coût des énergies conventionnelles va augmenter dans les décennies à venir. Partout à travers le monde, le taux de découverte des nouvelles réserves de pétrole est en déclin, tandis qu'en même temps la demande augmente. Les réserves conventionnelles restantes, bien que vastes, sont concentrées dans un petit nombre de pays. Les technologies d'énergies renouvelables ont généralement un coût d'investissement

supérieur (c-à-d. les coûts initiaux du projet) vis-à-vis des technologies conventionnelles concurrentes. Ceci a conduit certaines personnes à la conclusion que les technologies d'énergies renouvelables sont trop dispendieuses. Malheureusement, ce point de vue ignore les coûts très réels induits par l'exploitation et l'entretien de tous systèmes d'énergies, peu importe qu'ils soient renouvelables ou conventionnels. Les technologies d'énergies renouvelables ont généralement des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des technologies conventionnelles. En effet, les mesures d'efficacité énergétiques réduisent les besoins énergétiques, et les technologies d'énergies renouvelables utilisent des sources d'énergies renouvelables disponibles à un coût marginal minimal ou nul. Alors comment les coûts d'investissement élevés et les coûts d'exploitation faibles des technologies d'énergies propres peuvent-ils se comparer aux coûts d'investissement faibles et coûts d'exploitation élevés des technologies conventionnelles ? La réponse consiste à considérer tous les coûts sur toute la durée de vie d'un projet. Ceux-ci incluent non seulement les coûts initiaux (analyse de faisabilité, ingénierie, développement, achat d'équipements et installation) mais également :

1. Les coûts annuels pour le combustible, l'exploitation et l'entretien ;
2. Les coûts pour les mises en état majeures et les remplacements d'équipements ;
3. Les coûts pour le démantèlement du projet (qui peuvent être relativement élevés pour les technologies qui polluent un site, par exemple à cause des déversements de combustible) ;
et Les coûts de financement du projet, comme les frais d'intérêt.

L'ensemble de ces coûts doit être additionné, en prenant en compte de la valeur temporelle de l'argent, pour déterminer tous les coûts du « cycle de vie » d'un projet. Malgré leurs coûts d'investissement plus élevés, elles sont souvent rentables vis-à-vis des technologies conventionnelles une fois comparées sur la base du coût sur le cycle de vie. Les principaux coûts financiers en investissement qui sont liés à la réalisation et l'installation d'un système hybride peuvent être décomposés selon certaines rubriques à savoir :

1. Coût relatif aux études de conception.
2. Coût relatif aux équipements solaires et éoliens (modules photovoltaïques, aérogénérateurs, régulateurs, de charge et de décharge, onduleurs, éléments de batterie, diverses fournitures).
3. Coût de l'installation du système sur site.
4. Coût des travaux de génie civil.

5. Installation et mise en fonctionnement de la centrale.

2.4.0.1 Coût d'un système multi-sources (photovoltaïque, éolien, diesel) :

Le calcul du coût d'un tel système requiert la connaissance des éléments suivants :

1. La durée de vie
2. L'investissement initial.
3. Les coûts de maintenance annuels relatifs aux systèmes (photovoltaïque, éolien, diesel)
4. Les coûts de remplacements des différents sous-systèmes.
5. Les profits réalisés.

2.5 Conclusion

Il est très important de développer des modèles des éléments du système hybride afin de les utiliser dans une structure de supervision et de la configuration d'une cellule multi-sources. Un bref état de l'art portant sur les différents types d'hybridation nous a permis de mieux comprendre le système réel. Le chapitre suivant sera consacré à la simulation et le dimensionnement des systèmes hybride (PV, éolienne, diesel) à l'aide de logiciel Homer.

Chapitre 3

Simulation d'une cellule de sélection multi-sources (PV, Éolienne, Diesel, Réseaux)

3.1 Introduction :

La simulation et le dimensionnement d'une cellule multi-sources avec une carte de commande est une étape primordiale dans la caractérisation et la rentabilité à long terme d'un système de production d'électricité utilisant plusieurs sources d'énergies renouvelables ou non. La nature intermittente des sources d'énergie renouvelable ainsi que le grand nombre de configurations possibles de systèmes et d'équipements sont des caractéristiques qui contribuent à compliquer le processus de conception et d'exploitation d'un système multi-sources. Ainsi, plusieurs logiciels ont été conçus à cette fin.

3.2 Présentation des logiciels de simulation

Dans ce qui suit on donne une brève description de quelques logiciels utilisés dans la simulation des systèmes hybrides :

1. **HOMER (The hybrid optimisation model for electric renewables)** : Ce logiciel a été développé par le « National Renewable Energy Laboratory » NREL du département

d'énergie des États-Unis d'Amérique. Il est capable de simuler, dimensionner et d'optimiser un système hybride contenant différents composants : éolienne, PV, diesel, réseau, pile à combustible et batteries. Il exécute des simulations pour toutes les configurations possibles du système dans le but de vérifier si celles-ci sont réalisables. Il estime ensuite le coût d'installation et de fonctionnement du système et propose une liste des configurations, classées par rapport au coût de leurs cycles de vie. Aussi, il permet de trouver la meilleure combinaison des composants du système d'un point de vue économique.

2. **Retscreen International** : C'est un logiciel qui est à la fois un outil de sensibilisation aux énergies propres, d'aide à la décision et de renforcement de compétences. Il est développé par le laboratoire de recherche de diversification d'énergie CANMET du Canada. L'outil consiste en un logiciel normalisé et intégré d'analyse de projets d'énergies propres qui peut être utilisé partout dans le monde pour évaluer la production énergétique, les coûts du cycle de vie et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour différentes technologies d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. En plus du logiciel, l'outil comprend des bases de données (Produits, coûts et données météorologiques). Retscreen convient au dimensionnement des composants des systèmes photovoltaïques et hybrides PV/Diesel autonomes et non autonomes (connecté au réseau) et aux systèmes de pompage solaire.
3. **SOLSIM** : Il est développé au Fachhochschule Konstanz, en Allemagne. C'est un outil de simulation qui permet aux utilisateurs de concevoir, analyser et optimiser des systèmes connectés ou pas à un réseau et des systèmes électriques hybrides. Les sources d'énergie disponibles sont : panneaux PV, éoliennes, installations de biogaz ou de biomasse, batteries et générateurs diesels. C'est un progiciel qui comporte des outils différents : un programme de simulation général appelé SOLSIM, une unité d'optimisation de l'angle d'inclinaison des panneaux PV appelée SolOpti, une unité de calcul des coûts du cycle de vie appelée SolCal et l'unité simulant des générateurs éoliens appelée SolWind.
4. **PVSyst** : C'est un logiciel pour la conception, le dimensionnement et la simulation qui convient aux systèmes photovoltaïques et hybrides PV/Diesel autonomes et non autonomes (grid-connected) et DC-grid. Développé par l'université de Genève, il offre une base de données météorologique et des composants des systèmes photovoltaïques.

Dans le présent mémoire, nous avons opté pour le logiciel Homer [40] dont la version v3.11 est en téléchargement libre.

3.3 Simulation à l'aide de Logiciel Homer

3.3.1 Localisation de notre site (ESSA Tlemcen)

L'école supérieure en sciences appliquées (ESSAT) de Tlemcen est située au nord ouest de l'Algérie (voir figure (3.1)), avec les coordonnées géographiques suivantes : 34,877681 Nord 1.326599 Ouest (-1.326599).



FIGURE 3.1: Profil de charge de notre cellule installé sur le site ESSA Tlemcen.

3.3.2 Définir le profil de la charge

La puissance maximale que notre carte peut gérer est de 2.2KW. Bien que cette puissance est loin d'être suffisante pour le fonctionnement d'un établissement comme la nôtre (ESSAT), nous avons daigné prendre l'exemple de notre école. Nous déterminons donc le profil de charge qui caractérise cet établissement et la période de fonctionnement journalier à partir de 7h du matin jusqu'à 18h. Aussi, nous avons éliminé les vacances, les weekends et les périodes pendant lesquelles la carte n'est pas utilisée. Le profil de la charge est illustré sur la figure (3.2). On suppose que les pics de consommation sont constants d'une valeur de 2.2KW. En réalité, cette charge peut varier d'une heure à une autre et d'un jour à un autre. C'est pour cette raison que

Homer ajoute un bruit blanc d'une amplitude de 15% afin de rendre la charge plus réaliste. La charge consomme une énergie moyenne de 17.21 kWh/Jour.



FIGURE 3.2: Profil de charge de notre cellule installé sur le site ESSA Tlemcen.

3.3.3 Données météorologiques fournies par le logiciel HOMER

3.3.3.1 Températures moyennes sur le site de l'ESSAT

Les valeurs de températures moyennes mensuelles durant une année de site de Tlemcen (ESSA) sont données sur la figure (3.3). On constate qu'au mois de juillet la température moyenne mensuelle du site atteint son maximum avec une valeur de 27.98 °C. D'autre part, le minimum de la température moyenne mensuelle est atteint au mois de janvier.

3.3.3.2 Irradiation moyenne sur le site de l'ESSAT

Le profil de l'irradiation globale mensuelle moyenne durant une année de site de Tlemcen est donné sur la figure (3.4). Un maximum d'irradiation est obtenu durant le mois de juillet avec une moyenne de $7.3 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{jour}$ et un coefficient de clarté (clearness) égal à 0.647. Paradoxalement, même avec un maximum d'irradiation, le mois de juillet n'est pas celui pendant lequel le rendement des panneaux solaires est à son maximum, celui-ci étant fortement amoindri par l'élévation de la température en ce mois.

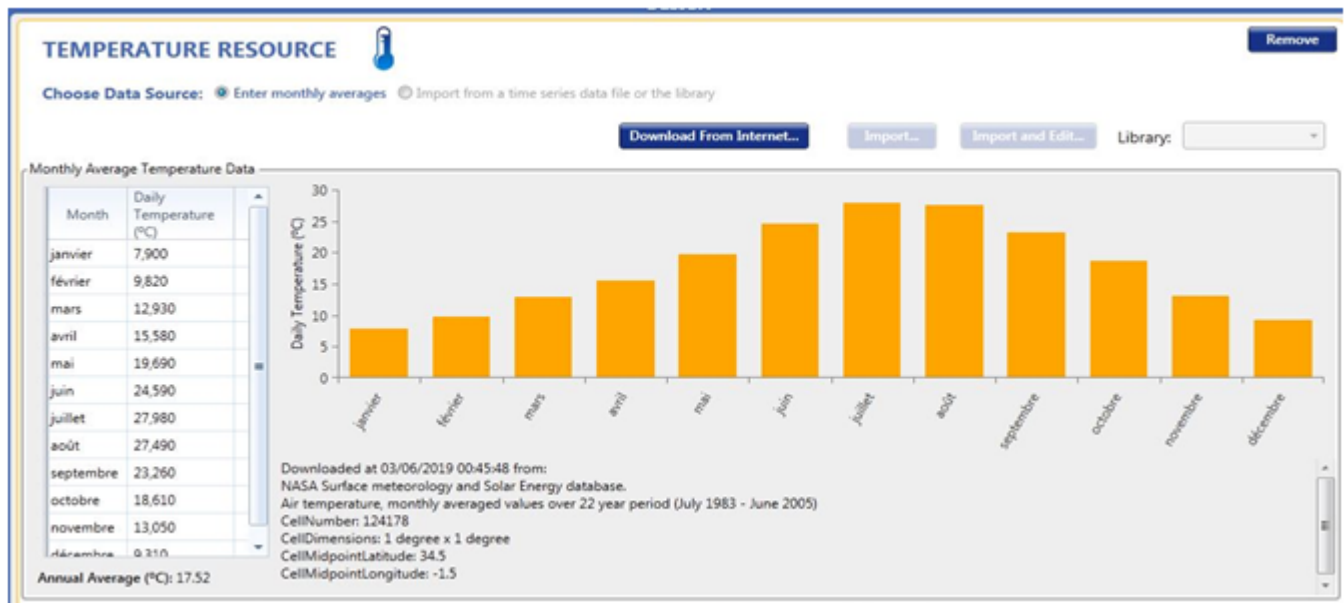


FIGURE 3.3: Températures moyennes sur le site de l'ESSAT.

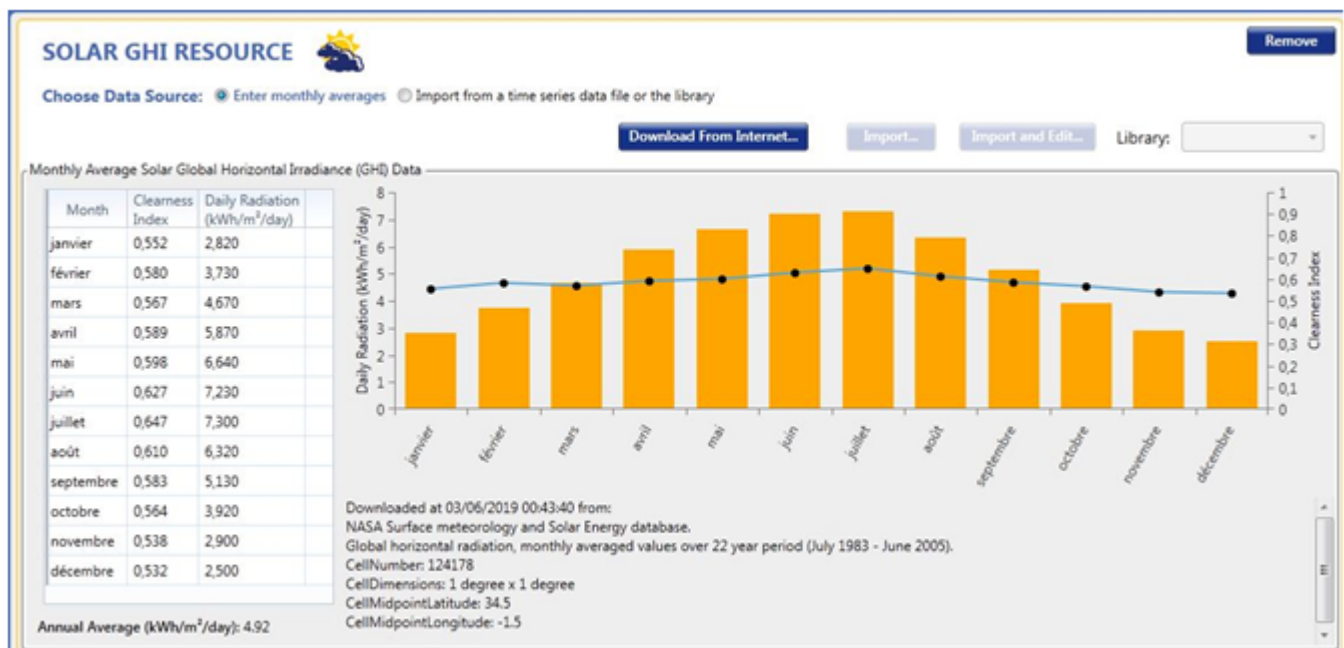


FIGURE 3.4: Profil de la ressource solaire.

3.3.3.3 Profil du vent mensuel moyen de l'ESSAT :

Les valeurs des vitesses de vent moyen mensuel durant une année à 50 m au dessus de la surface de la terre de site de Tlemcen (ESSA), fournies par le logiciel HOMER source NASA, sont illustrées sur la figure (3.5). Vu le profil du vent sur le site de l'ESSAT (faible), l'exiguïté de l'endroit et les couts exorbitants des éoliennes à axe horizontal, nous préconisons, si possible, le montage d'une éolienne à axe vertical de type Darrieus.

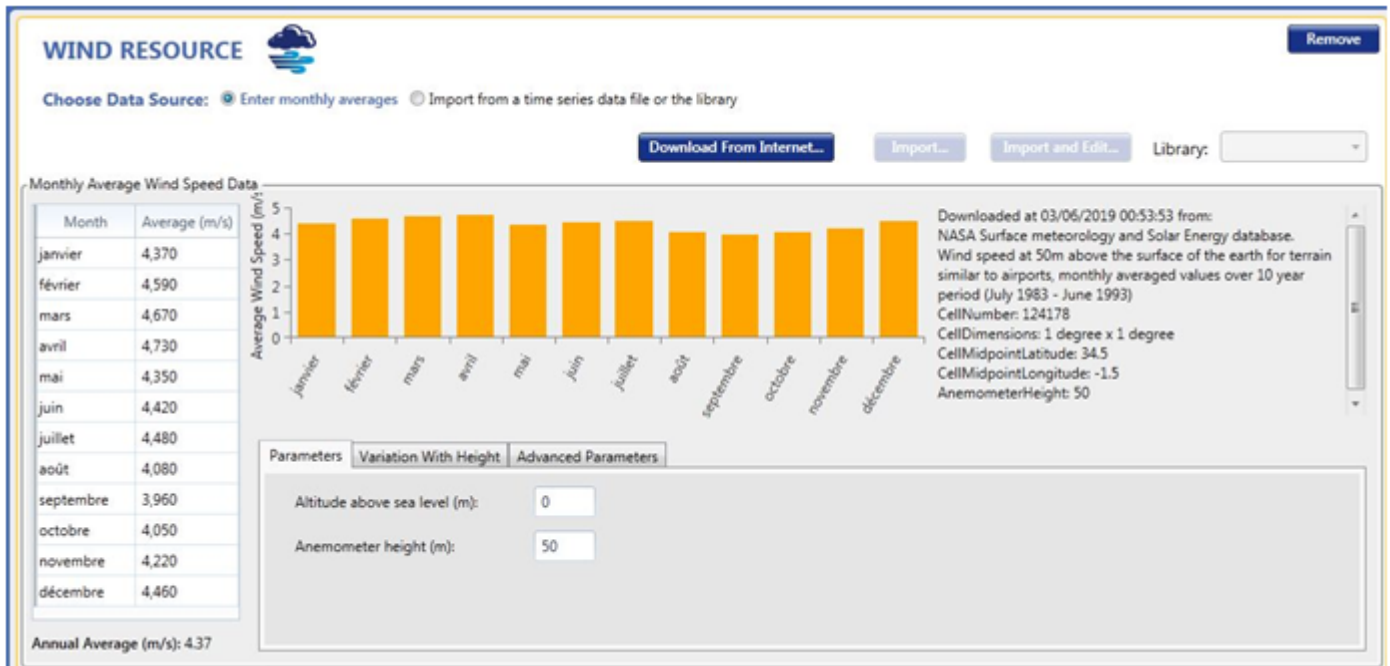


FIGURE 3.5: montre le profil du vent moyen pour chaque mois de l'année. Il varie entre 4 et 5 m/s.

3.3.4 Schéma électrique de la cellule multi-sources

Le schéma de la cellule multi-sources est illustré sur la figure (3.6). Elle est constituée d'une éolienne, de panneaux solaires, d'un groupe diesel, d'un réseau électrique ainsi qu'un convertisseur DC/AC. La puissance des panneaux solaires que nous avons choisis est de 4 kW, celle des éolienne 1.8KW et celle du groupe diesel 10KW. Homer teste toutes les combinaisons possibles en les triant par ordre croissant selon leur fiabilité et leurs coûts.

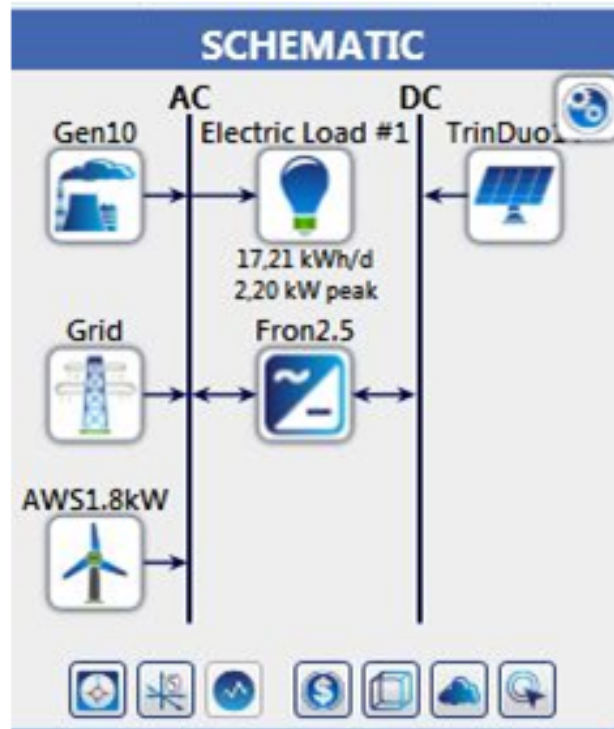


FIGURE 3.6: Schéma de la cellule multi-sources sur le logiciel HOMER.

3.3.5 Résultats de la simulation

L'éolienne choisie est une éolienne AWS HC de 1.8 kW, la hauteur du mat est de 12 m. La caractéristique puissance en fonction de la vitesse du vent est représentée sur la figure (3.7). Les simulations tiennent compte des valeurs maximale et minimale de la vitesse du vent, du

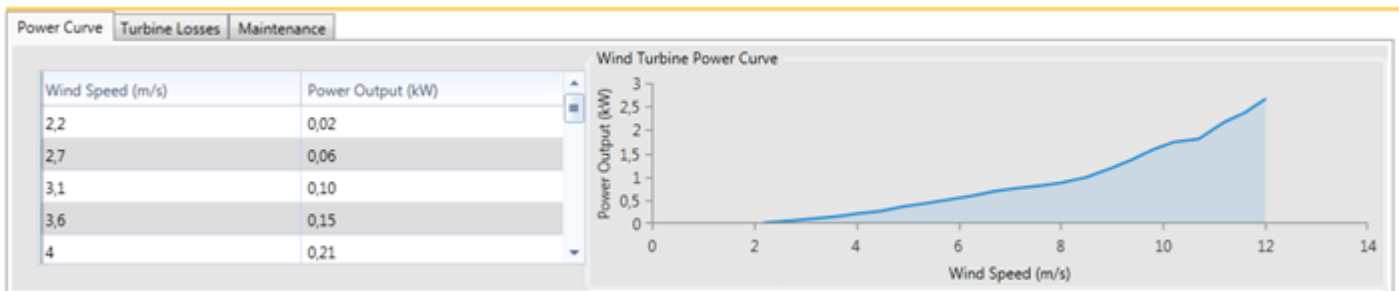


FIGURE 3.7: Caractéristique de l'éolienne de 1.8kW.

rayonnement global et des prix du carburant(diesel). Les résultats de simulation sont fournis sous la forme d'une liste de configurations classées selon la faisabilité, coût de l'installation (voir figure (3.8)).

Homer simule les différentes combinaisons des composants et les calculs de l'équilibre énergétique sont exécutés pour chaque configuration du système hybride considéré. Dans le cas où les

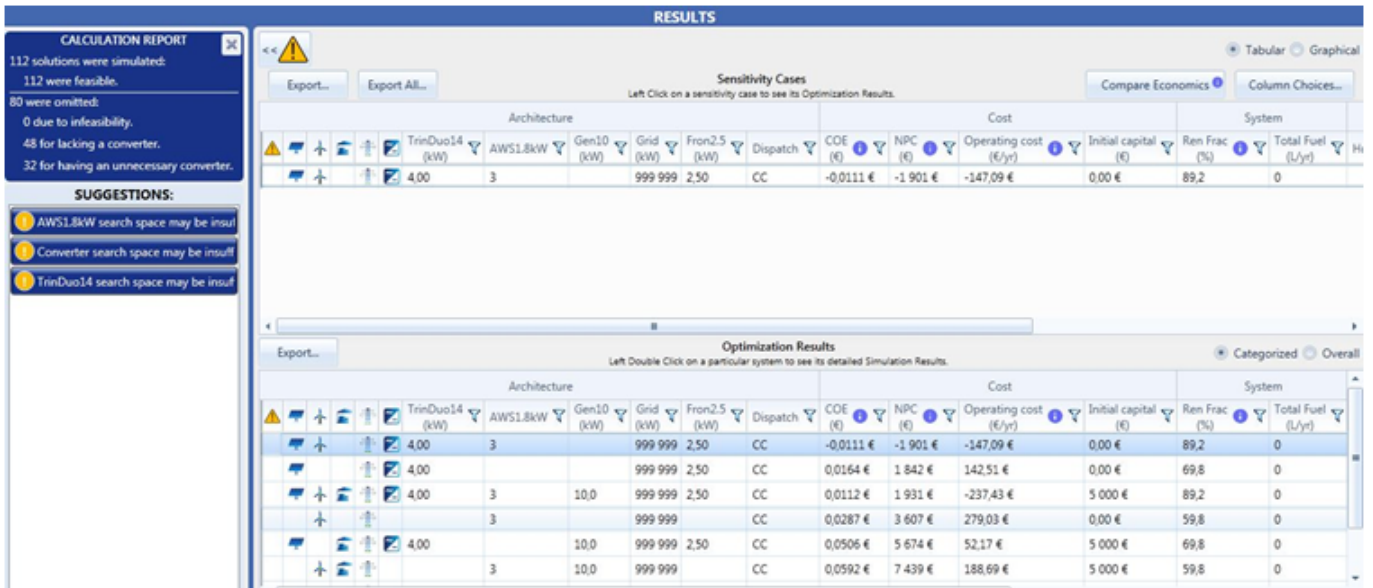


FIGURE 3.8: Résultats de simulation de la cellule sous HOMER.

ressources renouvelables sont à leur valeurs minimales et le prix du fuel à sa valeur maximale, l'éolienne et des panneaux solaires connectés aux réseaux électrique présenté sur la première configuration, offrent la solution la plus fiable et la moins couteuse. Le système optimal le moins cher et le plus fiable inclut l'éolienne, les PV, ainsi que le réseau électrique. La figure (3.9) présente la quantité d'énergie produite par les différentes sources d'énergie. Nous remarquons que le logiciel favorise l'énergie produite par le PV, et l'éolien connecté au réseau, alors que le groupe diesel reste comme source d'énergie secondaire sauf pour les cas de coupure.

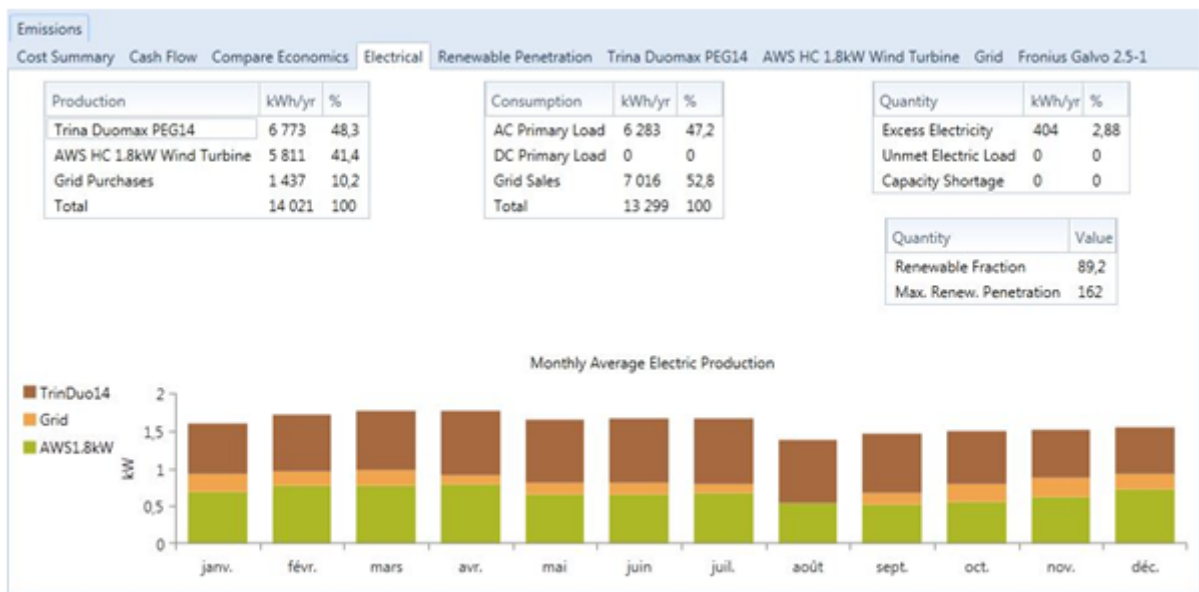


FIGURE 3.9: Quantité d'énergie totale mensuelle produite par le système hybride pendant une année.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait le dimensionnement et la simulation de notre cellule multi-sources installée sur le site de l'école en science appliquées de Tlemcen(ESSAT), ainsi que l'analyse de ces résultats. Le logiciel de modélisation Homer nous a permis de choisir la configuration de système hybride optimal, en l'occurrence celle qui fait la combinaison des trois sources (PV/éolien/réseau).

Chapitre 4

Réalisation de la cellule de sélection

4.1 Introduction

L'objectif principal de ce projet est de réaliser une cellule de sélection qui gère un système énergétique multi-source (solaire, éolienne, groupe Diesel, réseau électrique) en vue d'assurer une alimentation continue en électricité d'une charge, avec acquisition des données (énergie électrique produite, température et humidité) et enregistrement sur une carte mémoire. En effet, une exigence importante de la distribution d'énergie électrique est la nécessité d'avoir un système de fonctionnement automatique. Pour cela, on a monté sur la carte quatre relais commandés par une carte Arduino afin de démontrer la défaillance correspondante de cette alimentation.

4.2 Principe de fonctionnement

4.2.1 Organigramme

La figure (4.1) présente l'organigramme de cellule de sélection multi-sources réalisée dans le cadre de notre projet. On a utilisé une carte Arduino méga pour la commande de quatre relais qui permettent l'accès aux sources d'énergie pour alimenter une charge. En plus, on a intégré un capteur de courant et de tension pour faire les mesures ? Ces derniers vont être traités par la carte Arduino pour être emagasinés sur une carte mémoire.

Aussi, on a intégré un capteur de température et d'humidité DHT22. Les données sont affichées sur un afficheur LCD 16*2 et stockées sur la carte mémoire.

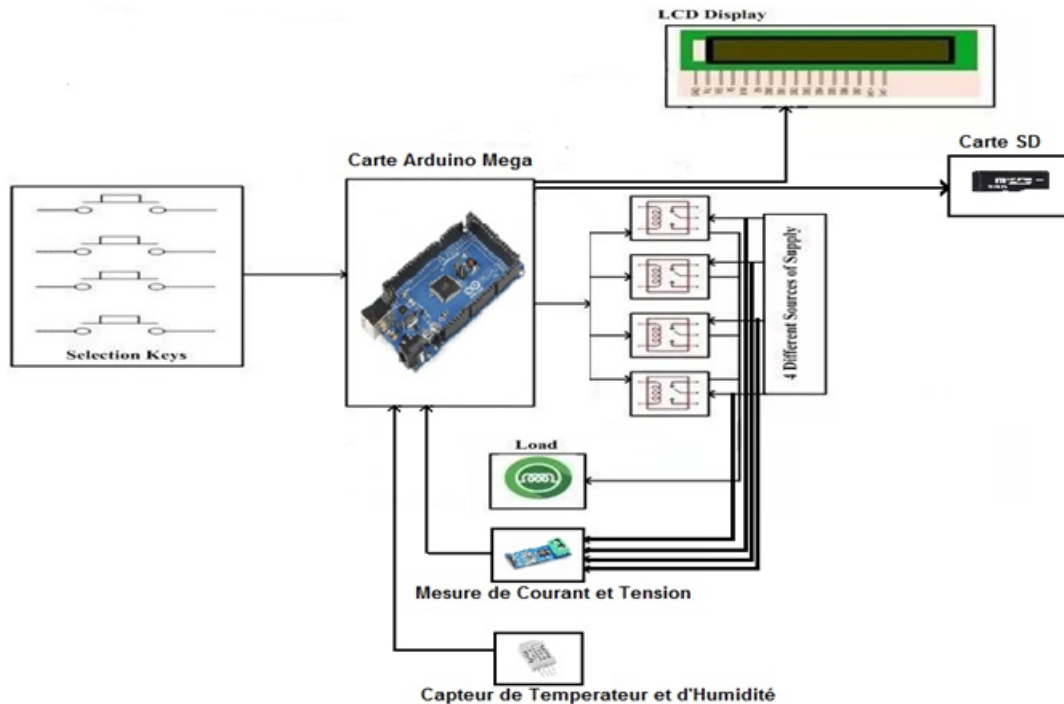


FIGURE 4.1: Schéma global de la cellule multi-sources.

La carte fonctionne en deux modes manuel et automatique :

- Commande manuelle : On utilise quatre boutons dont l'état (ouvert ou fermé) est détecté par la carte Arduino (entrée numérique), qui va commander les relais 5V (par les sorties analogiques), ce qui permet l'accès à la source qu'on veut faire fonctionner. La figure (4.2) représente l'organigramme qui explique le principe de fonctionnement en mode manuel de la cellule de sélection.
- Commande automatique : La carte Arduino peut détecter automatiquement la présence de l'une des sources à travers les capteurs de tension connectés aux entrées analogiques de la carte. À l'aide d'un programme installé, il est possible de commander automatiquement les quatre relais qui permettent l'accès aux sources d'énergie pour alimenter une charge. La figure (4.3) représente l'organigramme qui explique le principe de fonctionnement en mode automatique de la cellule de sélection.

Quatre commutateurs sont connectés aux entrées analogiques de la carte Arduino méga, laquelle vérifie l'état (ouvert ou fermé) des interrupteurs. La carte Arduino est ensuite reliée aux quatre relais (5 V) des sources d'énergie utilisées. Ces relais permettent l'alimentation par la source sélectionnée par l'interrupteur. La carte permet aussi de mesurer le courant et la

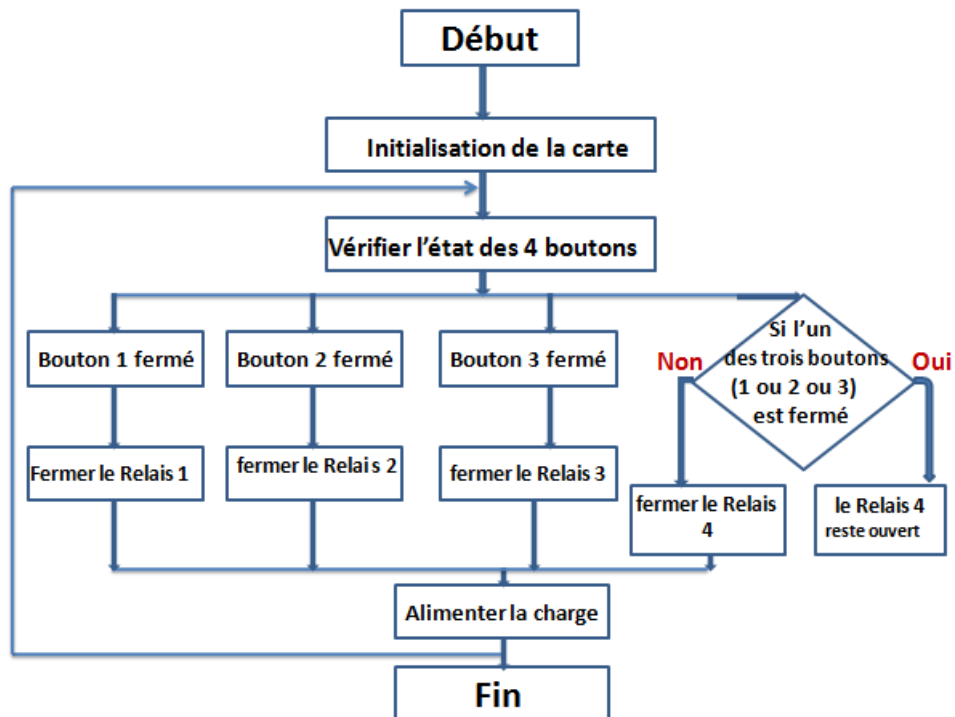


FIGURE 4.2: Organigramme de fonctionnement de la cellule en mode manuel.

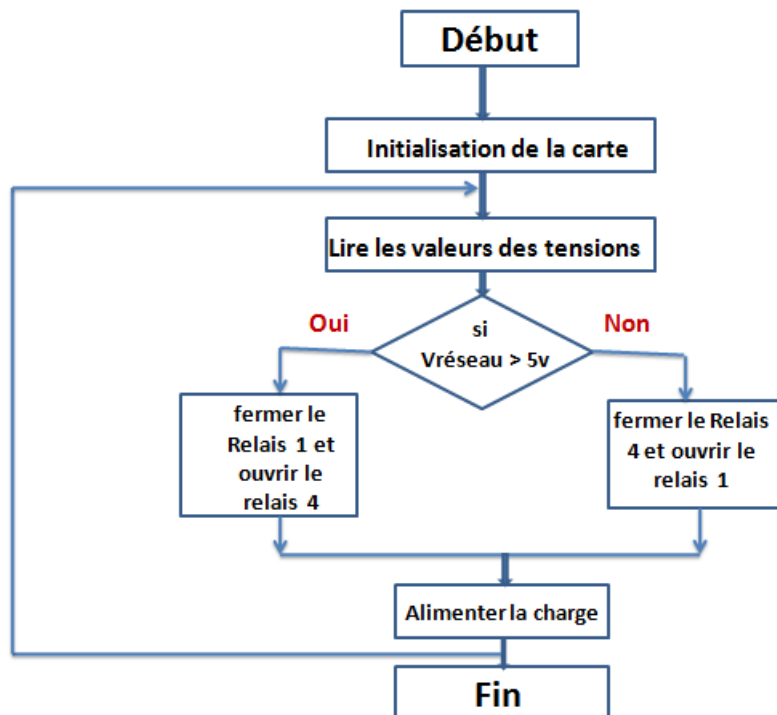


FIGURE 4.3: Organigramme de fonctionnement de la cellule en mode automatique.

tension à la sortie de la source en état de fonctionnement, tout en les enregistrant sur une carte mémoire. Un afficheur et des LED sont à même d'indiquer la source qui est en mode opérationnel. Aussi, un capteur de température et d'humidité est monté sur la carte.

Le principe de fonctionnement de cette carte est basé sur les résultats de la simulation avec le logiciel HOMER qu'on a effectué dans le chapitre précédent, à savoir : La combinaison se fait entre les sources d'énergie renouvelable solaire (PV) et éolienne avec le réseau alors que le groupe diesel est laissé comme source de secours juste pour les cas d'urgence (absence d'énergie renouvelable et coupure dans le réseau électrique). Pour cela, on considère le réseau électrique comme source principale, car c'est la source la plus fiable qui satisfait notre besoin en énergie à tout moment. Cependant, l'intégration des sources d'énergie renouvelable dépend de la disponibilité de celle-ci et de sa capacité à venir aux besoins de la charge ; ce qui nous permet de se passer partiellement ou totalement de l'énergie assurée par le réseau. Dans ce cas, on met les trois premiers relais (PV, Éolien, réseau) en état normal ouvert et celui du groupe diesel en état normal fermé. Par mesure de sécurité, un programme sous Arduino doit vérifier que les trois relais (PV, Éolien ,réseau) sont déjà en état fermé avant que la source de groupe diesel soit mise en fonctionnement.

Techniquement parlant, il est aussi possible de sélectionner la source d'énergie que l'on veut utiliser en appuyant sur l'un des commutateurs. Les interrupteurs sont connectés en entrée analogique de l'Arduino. Dans le tableau ci-dessous, on passe en revue les principaux composants utilisés dans le montage de la carte, avec un aperçu général, certaines de leurs caractéristiques et leurs coûts, respectifs. Les composants principaux utilisés sont : Une carte Arduino Mega, des relais 5V, des capteurs de courant ACS712 de 30A, un capteur de température et d'humidité DHT22, un afficheur LCD 16*2 et des LED pour afficher la source utilisée et une carte mémoire pour l'enregistrement des données.

4.3 Étaps de Réalisation

4.3.1 Simulation

Proteus est une suite logicielle permettant la CAO électronique éditée par la société Lab-center Electronics. Proteus est composé de deux logiciels principaux : ISIS, permettant entre

autres la création de schémas et la simulation électrique, et ARES, destiné à la création de circuits imprimés [39].

Les figures (4.4), (4.5) et (4.6) présentent, respectivement, le PCB, le circuit imprimé et quatre photos en 3D de la carte de puissance réalisée sous Isis Proteus V8.

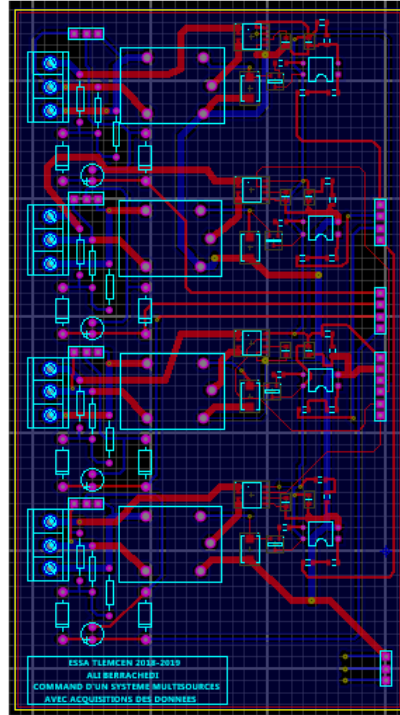


FIGURE 4.4: PCB de la carte sous Isis Proteus V8.

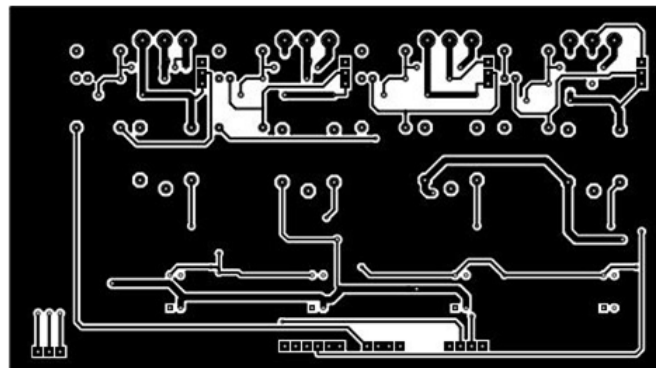


FIGURE 4.5: Le circuit imprimé de la carte de puissance réalisé par le logiciel Isis proteus.

La figure (4.7) présente les vues de face et de derrière de la carte de puissance.

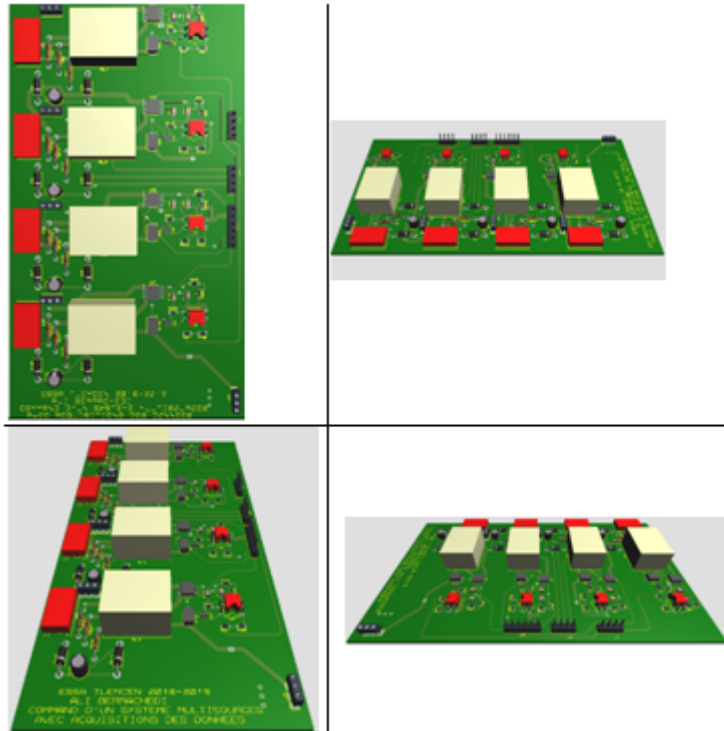
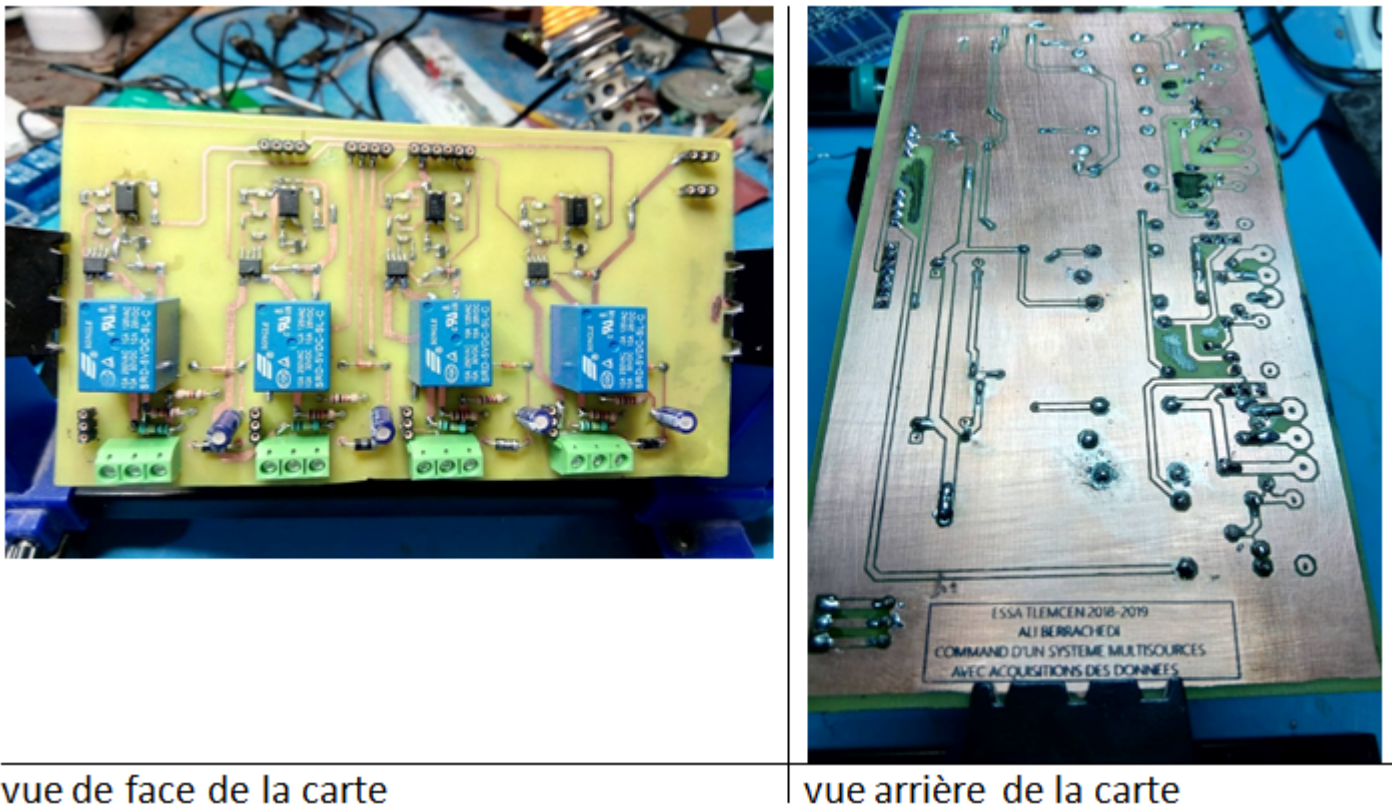


FIGURE 4.6: Photos en 3D de la carte de puissance.



vue de face de la carte

vue arrière de la carte

FIGURE 4.7: Vues de face et de derrière de la carte de puissance.

Sur la figure (4.8) on site les différents composants principaux de la cellule réalisée :

1. borniers pour brancher la source et la charge

2. circuits pour mesurer la tension
3. relais 5V
4. circuits pour mesurer le courant avec led vert pour indiqué la présence de capteur de courant
5. led pour indiquer l'état fermé du relais
6. points de commande des relais
7. points de mesure des courants
8. VCC
9. GND
10. points pour mesurer les tensions

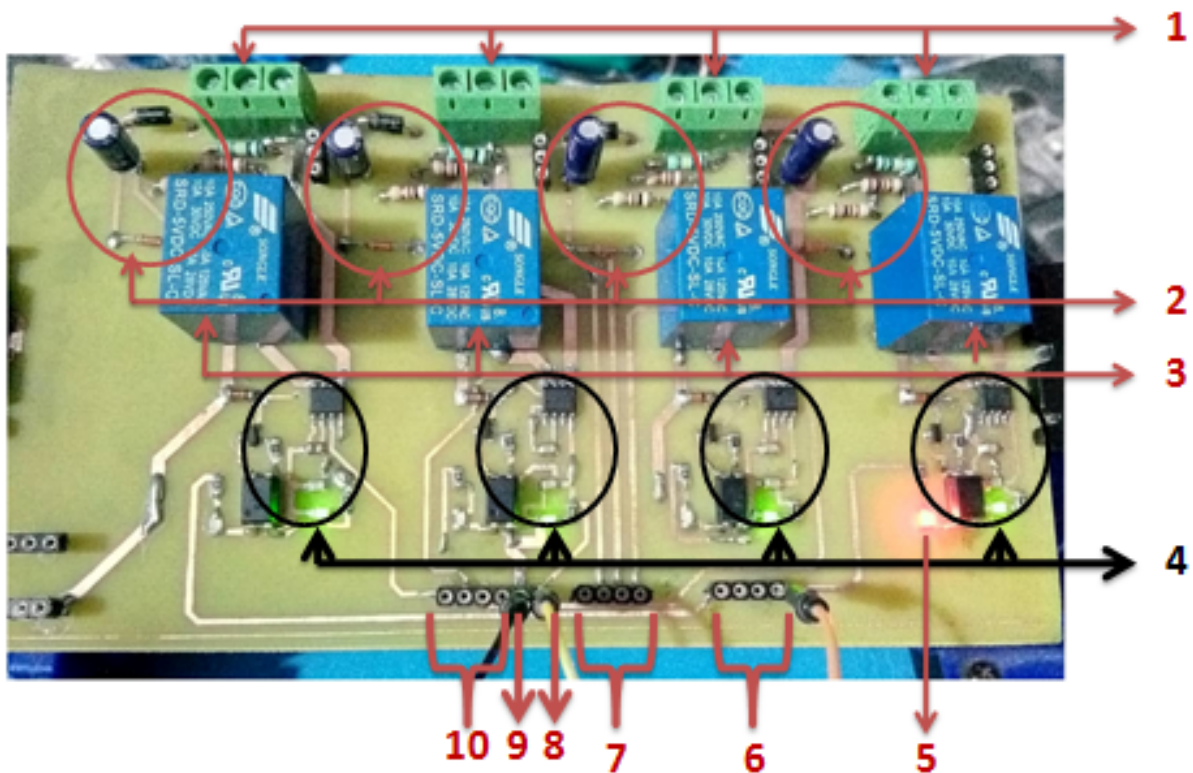


FIGURE 4.8: les composants principaux de la cellule.

4.4 Conclusion

La réalisation de la carte de commande est effectuée durant une période de stage au sein de l'entreprise SKTM de Ghardaia. La procédure de montage a connu quelques difficultés à cause de la non disponibilité sur le marché algérien de certains composants de la carte. Toutefois, il m'a été donné pendant cette période de s'affronter à quelques difficultés techniques qui ont enrichi mon apprentissage. Bien qu'elle soit de faible puissance, je considère la présente carte comme une innovation dans le domaine de la gestion des systèmes multi-sources, qui reste à développer dans le cadre de projets de fin d'études.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire de fin d'études est ambivalent : Faire une recherche bibliographique sur les systèmes de production d'électricité qui utilisent plusieurs sources (renouvelables et traditionnels), ce qui a permis de comprendre le fonctionnement et les caractéristiques de ces systèmes, et de réaliser, dans une période de quatre mois, une cellule de sélection permettant la gestion d'un système multi-sources à faible puissance (2.2 KW). La carte est conçue pour commander manuellement quatre source d'énergie (Pv, éolienne, diesel et réseau) et afficher la source d'énergie opérationnelle, en temps réel, à l'aide de LED et un afficheur LCD 16*2. Un aspect important de la carte est qu'elle permet l'acquisition des données de l'énergie électrique produite par chacune des sources et de les enregistrer (database) sur une carte mémoire.

L'importance du présent projet réside dans la diversité de ses applications. En effet, une combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelables ou non est toujours bénéfique à plusieurs aspects (réduction d'émission des gaz à effet de serre, minimiser les coûts de consommation) surtout pour les industriels, les hôpitaux, les banques, les écoles, etc. Il permet d'envisager un passage automatique à une source d'énergie renouvelable en cas d'interruption de l'alimentation par réseau.

Le travail pratique que j'ai effectué m'a amené aussi à toucher à plusieurs domaines techniques en relation avec mon projet de recherche, à savoir : La physique des énergies renouvelables, l'électronique analogique, les capteurs et les chaines d'instrumentation, les réseaux intelligents (smart grid), Arduino, l'électronique de puissance, etc, ...

Comme perspectives, il serait intéressant de développer cette carte de commande en augmentant sa puissance, en utilisant un automate de puissance, au lieu d'un simple programme arduino. Il serait aussi intéressant d'établir un algorithme qui permet l'automatisation et la supervision de la gestion des quatre afin de mener à bien le passage d'une source à une autre lorsqu'une source ou plusieurs ne sont pas opérationnelles.

Annexe

Points de vente




le lecteur trouve ci-dessous les liens de quelques points de vente des composants électroniques :




Tizi-tronic : <https://www.tizi-tronic.com/>

Dzduino electronics : <https://www.dzduino.com/>

Binarytech : <https://binarytech-dz.com/>

Orbit Electronic : <http://www.orbit-dz.com/>

Composant	Aperçu	description	coût
Arduino Mega 2560		<ul style="list-style-type: none"> - ATmega 1280 cadencé à 16MHz - 54 Entrées / Sorties numériques (dont 14 Sorties utilisables en PWM) - 4 Ports Série Matériels (UART) - Convertisseur USB/Série 16U2 - Alimentation par USB, batterie ou adaptateur AC/DC. 	4 000,00DA
Relais		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de relais : SRD - Tension nominale de bobine : DC 5V - Structure : Sealed Type - sensibilité Coil : 0.36W - Résistance de la bobine : 70-80 ohm - Contact à broche longueur : environ 3,5 mm - Capacité de contact : 10A / 250VAC, 10A / 125VAC, 10A / 30VDC, 10A / 28VDC 	150,00DA
Afficheur LCD		<ul style="list-style-type: none"> - Afficheur LCD avec la lumière bleue - Le module est une faible puissance caractère consommation module LCD avec un contrôleur intégré. - Le module peut être facilement interfacé avec un MCU. - Format d'affichage : 20 caractères x 4 lignes. - Tension d'alimentation : 5V. 	1 300,00DA

Composant	Aperçu	description	coût
Capteur de courant 30A		Le module est basé sur un ACS712 et permet de mesurer un courant jusqu'à 30 A. Il délivre une tension analogique en fonction du courant mesuré. Ce capteur de courant est basé sur le capteur ACS712, qui peut détecter avec précision les signaux de courant alternatif ou courant continu. Les courants maximale qui peut être détectée peuvent atteindre 30A et le signal de courant actuelle peut être lue via un port analogue, ACS712 de Allegro Microsystems utilise l'effet hall pour fournir une sortie analogique de 0.66mV par Ampère.	1 000,00DA
RTC (DS1307)		DS1307 est une puce d'horloge temps réel à faible consommation d'énergie avec 56 octets de RAM non volatile, une horloge de code BCD complet et un calendrier. L'adresse et les données seront transmises via un bus série bidirectionnel à deux fils, et la puce peut fournir des informations telles que secondes, minutes, heures, etc., et le nombre de jours de chaque mois peut être ajusté automatiquement. En outre, il existe une fonction de compensation pour l'année bissextile. L'indicateur AM / PM détermine si l'horloge fonctionne en mode 24 heures ou 12 heures. Un circuit de détection de l'alimentation intégré à la puce comporte des fonctions de détection de mise hors tension et de commutation de batterie. Caractéristiques : Dimension : 27mm * 28mm * 8.4mm 1 morceau de puce d'horloge temps réel (RTC) DS1307 I2C embarquée 1 morceau de mémoire EEPROM 24C32 32K I2C intégrée Un morceau de batterie au lithium rechargeable LIR2032 (non fourni sur la carte) avec un circuit de charge, il peut fournir 1 an de délai pour le DS1307.	500,00DA
Carte Mémoire		Carte mémoire micro SD 2Go	500,00DA



Composant	Aperçu	description	coût
Capteur de température et d'humidité DHT22		<p>DHT22 / AM2302 numérique Capteur d'humidité Température SHT15 Remplacer Logger</p> <p>Description :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Type : DHT22 / AM2302. — Résolution Précision : 0, 1. — Plage d'humidité : 0 – 100% HR. — Plage de température : $-40 \sim 80$ — Humidité précision de mesure : $\pm 2\%$ d'humidité relative. — Température de précision de mesure : $\pm 0,5 C$. 	1 300,00DA
SD carte reader		<p>Le module (adaptateur de carte MicroSD) est un module de carte Micro SD de lecteur, et l'interface SPI via le pilote de système de fichiers, système de microcontrôleur pour compléter la carte MicroSD lire et écrire fichiers.</p> <p>fonctionnalités du module sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Support Micro SD Card ($\leq 2G$), carte Micro SDHC ($\leq 32G$) (haute carte de débit) — Circuit de conversion de niveau du conseil d'administration qui peut interfacier niveau est 5V ou 3,3V — Alimentation est 4.5V 5.5V, circuit régulateur de tension de 3.3V carte — Interface de communication est un standard SPI interface — Taille : 4.1 x 2.4cm <p>Interface de contrôle : Un total de six broches (GND, VCC, MISO, MOSI, SCK, CS), GND à la masse, VCC est l'alimentation, MISO, MOSI, SCK est le bus SPI, CS est la sélection de puce signal de broche</p>	600,00DA

TABLE 4.1: Principaux composants électroniques utilisés dans la réalisation de la carte de commande

Bibliographie

- [1] RTE : sigle du réseau de transport d'électricité, gestionnaire du réseau de transport français.
- [2] L. Croci, Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. Automatique. Université de Poitiers, 2013. Français. tel-00943296
- [3] D. Elliott, "Emergence of European supergrids – Essay on strategy issues," Energy Strategy Reviews, vol. 1, no. 2, pp. 112-129, mai 2012.
- [4] Lamine Chalal. Coordination de systèmes multisources pour favoriser la production d'énergie électrique Renouvelable. Automatique / Robotique. Université Lille1, Sciences et Technologies, 2013.
- [5] M.K. Deshmukha and S.S Deshmukha, "Modeling of hybrid renewable energy systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, no. 1, pp. 235–249, 2008.
- [6] M.T. Iqbal, "Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system," Renewable Energy, vol. 28, no. 2, pp. 223–237, 2003.
- [7] O.A. Jaramillo, M.A. Borja, and J.M. Huacuz, "Using hydropower to complement wind energy : a hybrid system to provide firm power," Renewable Energy, vol. 29, no. 11, pp. 1887– 1909, 2004.
- [8] S. Kumaravela and S. Ashoka, "An Optimal Stand-Alone Biomass/Solar-PV/Pico- Hydel Hybrid Energy System for Remote Rural Area Electrification of Isolated Village in Western-Ghats Region of India," International Journal of Green Energy, vol. 9, no. 5, pp. 398-408, 2012.
- [9] M.J. Khan and M.T. Iqbal, vol. 30, no. 6, pp. 835–854, 2005.
- [10] W. Khattam and M.Salama, Electric Power Systems Research, vol. 71, no. 2, pp. 119-128, 2004.

-
- [11] A. Thomas, A. Göran, and S. Lennart vol. 57, no. 3, pp. 195-204, 2001.
- [12] J. Peirs, D. Reynaerts, and F. Verplaetsen, "A microturbine for electric power generation," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 113, no. 1, pp. 86-96, 2004.
- [13] Source CEA : Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives; site : <http://www.cea.fr/> DGEC : La Direction générale de l'énergie et du climat; site : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/direction-generale-lenergie-et-du-climat-dgec> EPRI : Electric Power Research Institute, site : <https://www.epri.com> Bernard Multon (ENS Cachan) : Ecole normale supérieure Paris-Saclay site : <http://ens-paris-saclay.fr/>
- [14] Gropotec Algérie, site : <https://grupotec.es/> , CDER Centre de développement des Energies Renouvelable, site : <https://www.cder.dz/>
- [15] J.A. Momoh, *Electric Power System Applications of Optimization*, 1st ed. New York : Marcel Dekker, 2001.
- [16] J. Morren, S.W.H. de Haan, and J.A., Ferreira, "Contribution of DG units to primary frequency control," in *International Conference on Future Power System*, Amsterdam, 2005.
- [17] A. Baghini, *Handbook of Power Quality*, 1st ed., Wiley, Ed. Chichester , UK : John Wiley, Sons, 2008.
- [18] R. Bañosa and F. Manzano-Agugliarob, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy : A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, 2011.
- [19] M. Tekin, D. Hissel, M.C. Pera, and J.M. Kauffmann, "Energy management strategy fore-embedded fuel-cell systems using fuzzy logic," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 595–603, 2007.
- [20] J.M. Yang, K.W.E Cheng, J. Wu, P. Dong, and B. Wang, "The study of the energy management system based-on fuzzy control for distributed hybrid wind-solar power system," in *International Conference on Power Electronics Systems and Application*, Hong Kong, China, 2004.
- [21] H.M.E. Torres and M. Velez-Reyes, "Hierarchical control of Hybrid Power Systems," in *Power Electronics Congress*, Marelos, Mexico, 2008, pp. 169-176.

-
- [22] S. P. Ngoffe, A. M. Imano, S. N. Essiane, Optimisation d'un superviseur flou par la méthode des couloirs : Application à la supervision d'un système PV/Diesel, Symposium de génie électrique, Juin 2016, Grenoble, France.
- [23] F. Mohamed and H. Kiovo, "System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 398-407, 2010.
- [24] Emmanuel Trélat, Notes de cours, Master de mathématiques, Université d'Orléans 2007/2008
- [25] S.A.J. Filho and E. Ruppert, "A predictive direct power control of doubly-fed induction generator," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Viña del Mar, Chile, 2010.
- [26] L. Lavoie and P. Lautier, "Nonlinear predictive power controller with constraint for a wind turbine system," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, Canada, 2006.
- [27] A. Kusiak, W. Li, and Z. Song, "Dynamic control of wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 456-463, 2010.
- [28] F. Tadeo and T. Alvarez, *IET Control Theory and Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 261-269, march 2009.
- [29] R.R. Negenborn, M. Houwing, B. De Schutter, and J. Hellendoorn, "Model predictive control for residential energy resources using a mixed-logical dynamic model," in *International Conference on Network in Sensing and Control*, Okayama, Japan, 2009.
- [30] M. Back, M. Simons, F. Kirschbaum, and V. Krebs, "Predictive control of drive trains," in *IFAC 15th World Congress*, Barcelona, 2002.
- [31] D. De Vito A. Miotti and R of the 5th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control USA, 2007.
- [32] S.S. Soman, H. Zareipour, O. Malik, and P. Mandal, "A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons," in *North American Power Symposium*, Texas USA, 2010.
- [33] A.J. Del Real, C. Bordons, and D.R. Ramirez, "Real-Time implementation of a constrained MPC for efficient airflow control in a PEM fuel cell," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 6, pp. 1892- 1905, 2010.

-
- [34] I.O. Feth, L.A. Dessaint, and K. Al-haddad, "Modeling and simulation of the electric part of a grid connected microturbine," in IEEE transactions on Power Engineering Society General Meeting, Colorado,USA, 2004.
- [35] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S.B. Kjaer, "Power electronic as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004
- [36] S. Astier, "Conversion photovoltaïque du rayonnement solaire à la cellule," Techniques de l'ingénieur, D 3 936 2008.
- [37] Y. Pankow, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque," Thèse de doctorat de l'ENSAM de Lille 2004.
- [38] N. Hadjsaid and J.C Sabonnadiere, La distribution d'électricité – Vol. 2, 1st ed. Paris : Lavoisier, 2000.
- [39] Wikipedia : <https://fr.wikipedia.org/>
- [40] Homer : logiciel libre (version 3.11) de simulation de systèmes multi-sources de production d'électricité.