



UNIVERSITÉ
DE REIMS
CHAMPAGNE-ARDENNE

Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Ecole Doctorale Sciences Technologie Santé 547

THÈSE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Discipline : AUTOMATIQUE, SIGNAL, PRODUCTIQUE, ROBOTIQUE

(Spécialité Automatique)

par

Abdelhak BEN JEMAA

le 12 décembre 2015

Coopération méta heuristique et logique floue pour le
dimensionnement d'une installation hybride.

Directeur de thèse

Mr Abdelaziz HAMZAOUI

Mr Farouk Yalaoui	Pr à l'Université technologique de Troyes	Président
Mr Rachid Bouyekhf	Mc à l'Université de Belfort-Montbéliard	Rapporteur
Mr Saïd doubabi	Pr à l'Université de Marrakech	Rapporteur
Mr Abdelaziz Hamzaoui	Pr à l'Université de Reims Champagne-Ardenne	Examineur
Mr Faicel Hnaien	Mc à l'Université technologique de Troyes	Examineur

N° attribué par la bibliothèque

||R|E|I| | | | |

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été effectués sur le site Troyes du laboratoire Centre de Recherche en Science et Technologie de l'Information et de la Communication (CRESTIC) - EA 3804 au sein de l'équipe Automatique et Systèmes Hybrides, en collaboration avec Le Laboratoire d'Optimisation des Systèmes Industriels (LOSI) de l'UTT.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Hamzaoui Abdelaziz directeur de thèse, et Monsieur Faicel Hnaien, co-directeur de ces travaux de thèse, pour leur aide précieuse tout au long de ma thèse, pour leurs qualités humaines créant un environnement de travail chaleureux ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont témoignée.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Najib Essounbouli et Monsieur Farouk Yalaoui pour leur participation à ces travaux et leurs conseils toujours éclairés.

Je souhaite aussi remercier Monsieur Said Doubabi et Monsieur Bouyekhf Rachid pour avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse.

Résumé

Cette thèse propose la méthodologie de dimensionnement pour optimiser la configuration de système d'énergie hybride qui se compose de deux sources : panneaux photovoltaïques et éoliennes. Pour cela, nous utilisons une approche pour la génération de base de règles floues et une optimisation automatique au moyen d'algorithme génétique et d'un PSO adaptés avec le flou. Ces algorithmes nous permettent d'obtenir le nombre optimal de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et des batteries, minimisant le coût total du système et garantissant la disponibilité permanente de l'électricité pour couvrir les besoins énergétiques. L'historique horaire de vitesse du vent, d'ensoleillement, sont utilisés pour modéliser la production des éoliennes, la production photovoltaïque et de charge. Le coût total est la fonction objective et la taille technique est une contrainte.

Mots clés

Système hybride, énergie renouvelable, dimensionnement, optimisation, logique floue, méta heuristique, supervision.

Abstract

This thesis proposes the optimum sizing methodology to optimize the configuration of hybrid energy system. For this, we use an approach for automatic fuzzy rule base generation and optimization by means of Fuzzy-Adaptive Genetic Algorithm and fuzzy adaptive PSO. This Algorithms allows us to obtain the optimal number of photovoltaic panels, wind turbines and storages units, ensuring the minimal global high efficiency system total cost and guaranteeing the permanent availability of energy to cover the load energy requirements. Historical hourly wind speed, solar irradiance and load data are used to stochastically model the wind turbines, photovoltaic generation and load. The total cost is the objective function and the technical size is a constraint.

Keys words

Hybrid system, fuzzy logic, meta heuristics, sizing, supervision, renewable energy.

Table des matières

Remerciements	1
Introduction générale	17
1 Contexte et problématique	19
I. Panorama	19
1. Contexte mondial	19
1.1. La production d'électricité dans le monde	19
1.2. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde	20
2. Contexte français	21
2.1. La production d'électricité en France	21
2.2. La production d'électricité d'origine renouvelable en France	22
3. Conclusion	27
II. Énergie photovoltaïque	27
1. Définition	27
2. La photopile	27
2.1. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque	28
3. Le module photovoltaïque	28
3.1. Association en série	29
3.2. Association en parallèle	29
4. Conclusion	30
III. Énergie éolienne	30
1. Définition	30
2. Conversion cinétique - mécanique	31
3. Conversion mécanique - électrique	32
3.1. Générateur asynchrone	32
3.2. Générateur asynchrone à double alimentation	33
3.3. Générateur synchrone à rotor bobiné	33
3.4. Générateur synchrone à aimant permanent	34

3.5.	Choix du générateur	35
3.6.	Vitesses fixe et/ou variable	35
4.	Conclusion	36
IV.	Systèmes de stockage	36
1.	Par voie électrochimique	36
1.1.	Les batteries	36
1.2.	Les accumulateurs à circulation	37
1.3.	La pile à combustible	38
2.	Par voie électrostatique	38
3.	Par voie électromagnétique	38
4.	Par voie mécanique	38
5.	Conclusion	39
V.	Utilisation de l'énergie renouvelable	39
1.	Systèmes raccordés au réseau	40
2.	Systèmes autonomes	40
3.	Conclusion	41
VI.	Conclusion	41
2	Modélisation	43
I.	Dimensionnement du système d'énergie hybride	43
1.	Introduction	43
2.	Configuration du système d'énergie hybride	43
2.1.	Architecture à bus CC	43
2.2.	Architecture à bus CA	44
3.	Système de conversion d'énergie hybride	45
II.	Énergie photovoltaïque	46
1.	Introduction	46
2.	Modélisation du rayonnement solaire	46
2.1.	Calcul de la position du soleil	47
2.2.	Caractéristiques du flux solaire	49
2.3.	Estimation de l'ensoleillement en utilisant trois méthodes simples	52
2.4.	Conclusion	55
3.	Modélisation de la production d'énergie	55
III.	Énergie éolienne	56
1.	Introduction	56

1.1.	La distribution de Weibull	56
1.2.	Influence des paramètres Weibull sur la distribution statistique des vitesses de vent	56
1.3.	Détermination des paramètres de Weibull	57
1.4.	La méthode graphique (Moindre carrés)	57
1.5.	méthode du maximum de vraisemblance	57
2.	Extrapolation verticale de la vitesse du vent	58
3.	Puissance produite par le générateur éolien	58
4.	Estimation de la production énergétique	58
4.1.	Estimation de la production énergétique mensuelle	60
4.2.	Estimation de la production énergétique annuelle	61
4.3.	Estimation de la production énergétique horaire	64
5.	Conclusion	64
IV.	Modélisation d'énergie du stockage	65
1.	Premier scénario	66
2.	Deuxième scénario	67
3.	Les limites de l'état de chargement des batteries	68
V.	Convertisseurs	69
VI.	Critère à optimiser	69
0.1.	Le coût d'achat du système	70
0.2.	Le coût de maintenance	70
0.3.	Le coût de renouvellement des composants	70
0.4.	Le coût total	71
1.	Contraintes	71
VII.	Conclusion	72
3	Dimensionnement d'un système hybride non connecté au réseau	73
I.	Introduction	73
1.	Optimisation difficile	73
II.	Les méthodes d'optimisation	73
1.	Les méthodes déterministes	73
1.1.	Méthodes gradient	74
1.2.	Les méthodes géométriques ou heuristiques	74
2.	Les méthodes stochastiques	75
2.1.	Les algorithmes génétiques	75
2.2.	Optimisation par essais particuliers	78

III.	Logique floue	80
1.	Fuzzification	81
2.	La base de règles	82
3.	Méthode d'inférence floue	82
4.	Défuzzification	82
IV.	Travail développé	83
1.	Codage des solutions et fonction Fitness	83
1.1.	Codage des solutions	83
1.2.	Fonction Fitness	84
1.3.	Génération de la population initiale	84
1.4.	Selection	85
1.5.	Opérateur de mutation	85
2.	Algorithme génétique hybridé avec le floue	86
3.	Résultats expérimentaux	88
3.1.	Conditions expérimentales	89
3.2.	Résultats expérimentaux	91
4.	Algorithme PSO hybridé avec le floue	92
5.	Résultas	94
5.1.	Conditions expérimentales	94
5.2.	Résultats expérimentaux de l'algorithme génétique	95
V.	Conclusion	96
	Conclusion et perspectives	99

Table des figures

1.1	Répartition de la production d'électricité - 2012 [Observ, 2014]	20
1.2	Taux de croissance annuel moyen 2002-2012 [Observ, 2014]	20
1.3	Structure de la production électrique d'origine renouvelable - 2012 [Observ, 2014]	21
1.4	Consommation d'énergie primaire par type d'énergie Total : 259,4 Mtep - 2012 [Observ, 2014]	22
1.5	Consommation d'énergie primaire par type d'énergie Total : 259,4 Mtep - 2012 [Observ, 2014]	22
1.6	Production brute d'électricité renouvelable par filière – Total : 82,4 TWhEn % - 2012 [Observ, 2014]	23
1.7	Évolution de la production hydraulique brute renouvelable [Observ, 2014]	24
1.8	Évolution de la production d'électricité éolienne En GWh [Observ, 2014]	25
1.9	Évolution de la production d'électricité solaire En GWh [Observ, 2014]	26
1.10	Surface du parc solaire thermique [Observ, 2014]	26
1.11	Évolution de la consommation primaire de bois-énergie par secteur [Observ, 2014]	26
1.12	Cellule élémentaire photovoltaïque	28
1.13	Cellules identiques en série	29
1.14	Cellules identiques en parallèles	30
1.15	Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne	30
1.16	Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical	31
1.17	Générateur asynchrone à cage d'écureuil	32
1.18	Générateur asynchrone à double alimentation	33
1.19	Générateur synchrone (à rotor bobiné ou à aimant permanent)	34
1.20	Cellule électrochimique de base	37
2.1	Configuration de SEH à bus CC [Vechiu, 2005]	44
2.2	Configuration de SEH à bus AC [Vechiu, 2005]	45
2.3	Schéma de principe du système hybride photovoltaïque- éolien	46
2.4	La position du soleil peut être décrite par son angle α d'altitude et β angle d'azimut.	47

2.5	L'angle entre le soleil et l'équateur est appelé δ la déclinaison solaire. [Masters, 2013]	48
2.6	L'influence de nébulosité sur l'ensoleillement sur 3 différents mois . . .	52
2.7	L'ensoleillement dans les deux cas : ciel clair et nuageux entre 2009 et 2011	52
2.8	L'ensoleillement moyen journalier pour chaque mois	53
2.9	Comparaison entre l'ensoleillement calculée et les trois modèles	55
2.10	Histogramme et rose des vents	59
2.11	Histogramme et rose des vents en janvier à 10m	60
2.12	Histogramme et rose des vents en fevrier à 10m	60
2.13	Histogramme et rose des vents en mars à 10m	61
2.14	Histogramme et rose des vents en avril à 10m	61
2.15	Histogramme et rose des vents en mai à 10m	62
2.16	Histogramme et rose des vents en juin à 10m	62
2.17	Histogramme et rose des vents en juillet à 10m	62
2.18	Histogramme et rose des vents en août à 10m	63
2.19	Histogramme et rose des vents en septembre à 10m	63
2.20	Histogramme et rose des vents en octobre à 10m	63
2.21	Histogramme et rose des vents en novembre à 10m	64
2.22	Histogramme et rose des vents en décembre à 10m	64
2.23	Moyenne horaire de la vitesse et des paramètres de weibull à 10m dans la région de Troyes Barberey	65
2.24	Puissance pour une éolienne à axe verticale à 10m dans la région de Troyes Barberey	65
2.25	Histogramme et rose des vents annuel à 10m dans la région de Troyes Barberey	66
2.26	Moyenne horaire de la vitesse et des paramètres de weibull à 10m dans la région de Troyes Barberey	68
2.27	Puissance horaire pour une éolienne à axe verticale à 10m dans la région de Troyes Barberey	68
3.1	représentation schématique du croisement en 1 point	76
3.2	Mutation d'un gène	77
3.3	Algorithme génétique	78
3.4	Déplacement d'une particule.	79
3.5	Système floue	81
3.6	Représentation de chromosome	84
3.7	Représentation de chromosome	86

3.8	Diagramme de l'AG développé	87
3.9	Fonctions d'appartenance de l'Entrée 1 : "a"	88
3.10	Fonctions d'appartenance de l'Entrée 2 : diversité "d"	88
3.11	Fonctions d'appartenance de Sortie 1 : Type de Croisement	89
3.12	Fonctions d'appartenance de Sortie 2 : Pourcentage de mutation	89
3.13	Règles du système floue pour l'algorithme génétique	90
3.14	L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance pour AG . . .	90
3.15	L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance pour AG floue	91
3.16	Covergence de coût pour l'AG en bleue et l'AG floue en rouge	91
3.17	Diagramme d'un PSO développé	93
3.18	Fonctions d'appartenance de l'Entrée 1 : "a"	93
3.19	Fonctions d'appartenance de l'Entrée 2 : Erreur "e"	94
3.20	Fonctions d'appartenance de Sortie 1 : coefficient d'accélération " c_1 " . . .	94
3.21	Fonction d'appartenance de Sortie 2 : coefficient d'accélération " c_2 " . . .	95
3.22	Rules of Fuzzy System of PSO	95
3.23	L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance de PSO . . .	96
3.24	L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance de PSO floue	96
3.25	Covergence de coût pour le PSO en bleue et le PSO floue en rouge . . .	97

Liste des tableaux

2.1	L'ensoleillement moyen mensuel chaque heure (en W/m^2) entre 00h et 23h	53
2.2	Coefficients d'Angström	54
2.3	les indicateurs statistiques de précision	55
2.4	Étude statistique annuelle du vent pour chaque direction	66
2.5	La vitesse, les paramètres de weibull et la puissance (par W/m^2) entre 00h et 23h en moyenne	67

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être. Le développement et l'exploitation des ressources renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années. Cette production par source d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Toutes les énergies renouvelables (solaire, éolienne hydraulique, biomasse...) viennent du soleil transformées ensuite par l'environnement terrestre. Ainsi, les énergies solaire et éolienne sont les plus développées et présentent de nombreux avantages. En effet, ce sont des énergies complètement propres, elles n'émettent ni déchets ni gaz à effet de serre. Leurs fonctionnements ne polluent ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et convertissent en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine.

La demande sans cesse croissante de l'énergie ainsi que les préoccupations environnementales liées aux gaz à effet de serre amènent de plus en plus d'entreprises à se tourner vers l'énergie renouvelable comme une alternative pour le futur. Le but de cette thèse est de dimensionner une installation hybride pour alimenter une installation industrielle sans faire appel au réseau qu'en cas d'urgence, ce qui permet l'auto production en énergie électrique pour avoir une production verte. Dans ce cas on considère notre installation industrielle comme un site isolé.

Dans les régions isolées, l'énergie électrique est généralement assurée par les générateurs diesel à cause de leurs fiabilités, faibles coûts d'installation, la densité de l'énergie fournie ainsi qu'ils sont facilement à exploiter. Cependant, le coût de l'énergie produite par ce type de générateurs est devenu cher dû au sur-coût du carburant surtout avec l'éloignement, et le coût très élevé de la maintenances. En outre, ils participent au dégagement des gaz à effet de serre. L'utilisation des sources d'énergie renouvelables pour produire une énergie électrique propre et durable peut représenter une des meilleures solutions pour surmonter ces problèmes. Le majeur défi qui freine la généralisation de l'utilisation de ce type d'énergie est son décalage avec la consommation ainsi que son intermittente qui est naturelle. Dans ce cas, revenir au système de stockage est obligatoire pour assurer l'énergie requise continuellement. Pour cette raison, l'implantation d'un système à base des énergies renouvelables a besoin d'une grande précaution lors de sa conception.

Les problèmes d'optimisation occupent actuellement une place importante dans la communauté des scientifiques et des décideurs. En effet, ce genre de problèmes intervient dans leurs domaines d'activité qui sont très divers, comme le dimensionnement

d'un système hybride, la conception de systèmes mécaniques, le traitement d'images, l'électronique ou la recherche opérationnelle. Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif et un ensemble de contraintes. L'espace de recherche est l'ensemble des solutions possibles du problème. Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver la ou les meilleures solutions (en minimisant et/ou maximisant la/les fonctions objectifs du problème posé), tout en satisfaisant un ensemble de contraintes définies par l'utilisateur. Certains problèmes d'optimisation sont qualifiés de difficiles, et leur résolution dans un temps raisonnable nécessite l'utilisation d'algorithmes sophistiqués, comme les méthodes approchées (Les heuristiques et les métaheuristiques). Parmi les métaheuristiques destinées à résoudre ces problèmes, plus précisément les problèmes de dimensionnement, l'algorithme génétique et l'optimisation par essaim particulaire (OEP, ou PSO en anglais). L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie pour une conception optimale d'un système d'énergie hybride basée sur l'intelligence artificielle. Un algorithme génétique et un PSO sont utilisés pour donner la taille optimale qui va garantir l'approvisionnement en énergie électrique sans interruption. Le contrôle du système d'énergie hybride est très difficile à cause de la nature aléatoire des ses paramètres. Pour cette raison, on a proposé un contrôleur basé sur la logique floue dans l'objectif de bénéficier les avantages de ce type de contrôleur. Afin d'augmenter les performances du système, l'optimisation de la taille des composantes est faite.

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre aborde l'étude sous une forme assez descriptive. En effet, nous décrirons le contexte de la production de l'énergie électrique des sources renouvelables. Ensuite, à travers des revues de la littérature disponible, nous dresserons un état de l'art des différentes technologies photovoltaïques, éoliennes et batteries. Le but étant qu'à la fin de ce chapitre, le cadre de l'étude soit clairement identifié.

Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier les architectures d'un système hybride, ainsi qu'une étude détaillée du potentiel solaire en estimant trois différents modèles : linéaires, quadratique et cubique dans le cas d'un ciel clair et nuageux. Ensuite, nous définissons le potentiel du vent, en calculant les paramètres de Weibull horaire, mensuel et annuel. Puis, nous parlons des modèles de l'énergie du stockage qui seront utilisés et enfin nous expliquons notre modèle en donnant la fonction objective et toutes les contraintes.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes notions des heuristiques (Algorithme génétique et PSO) ainsi que la logique floue qui sont des connaissances nécessaires à la bonne compréhension de ce mémoire. L'objectif fondamental des réseaux autonomes est de fournir aux clients de l'énergie électrique, donc nous présenterons aussi le travail développé des heuristiques hybridé avec un contrôleur floue, une étude de robustesse sera faite et les résultats de simulation seront également présentés pour montrer l'efficacité de notre travail.

Enfin, les principales conclusions de ce travail de recherche et les perspectives qui en résultent sont données dans les conclusions générales

Chapitre 1

Contexte et problématique

I. Panorama

Durant ces dernières années, de nombreux travaux de recherche ont été menés avec pour objectif la gestion et la maîtrise de la demande énergétique et ce, dans tous les domaines. Pour mieux cerner le besoin de la gestion énergétique, ce chapitre rappelle le contexte énergétique mondial et français avec une attention particulière portée à l'énergie électrique. Il est mis en évidence ici les nouvelles problématiques de gestion du réseau électrique lequel gagne en complexité ce qu'il perd en sûreté du fait notamment de la multiplicité des acteurs et de l'apparition de nouvelles sources et charges non conventionnelles.

1. Contexte mondial

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. L'exploitation des énergies renouvelables est une solution indispensable. On peut prévoir que tout système énergétique durable dans le futur sera basé sur l'utilisation de ces sources.

1.1. La production d'électricité dans le monde

En 2012, la production d'électricité renouvelable (incluant la production des centrales de pompage-turbinage) a atteint 4699.2TWh dans le monde, franchissant nettement le seuil des 20% de la production d'électricité mondiale (20.8%). Les combustibles fossiles demeurent le noyau dur de la production d'électricité mondiale avec plus de deux tiers du total (68.1% en 2012), et un peu plus d'un électron sur dix (10.9%) est d'origine nucléaire. Les 0.2% restants sont apportés par la combustion des déchets qualifiés non renouvelables (figures 1.1).

L'hydraulique s'est trouvée seule pendant des nombreuses années pour compenser la marche en avant des combustibles fossiles. Ce n'est plus le cas aujourd'hui. L'apport des nouvelles technologies de production d'énergies renouvelables a été décisif pour freiner l'augmentation de la part des sources conventionnelles dans le total mondial, et ainsi réduire la production des gaz à effet de serre. Sur la période 2002-2012, la croissance de la production des filières renouvelables hors hydraulique a été près de cinq fois plus rapide que celle de l'hydraulique (15,1% contre 3,1%).

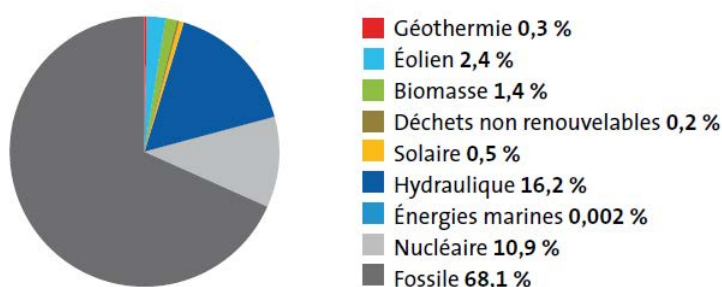


FIGURE 1.1 – Répartition de la production d'électricité - 2012 [Observ, 2014]

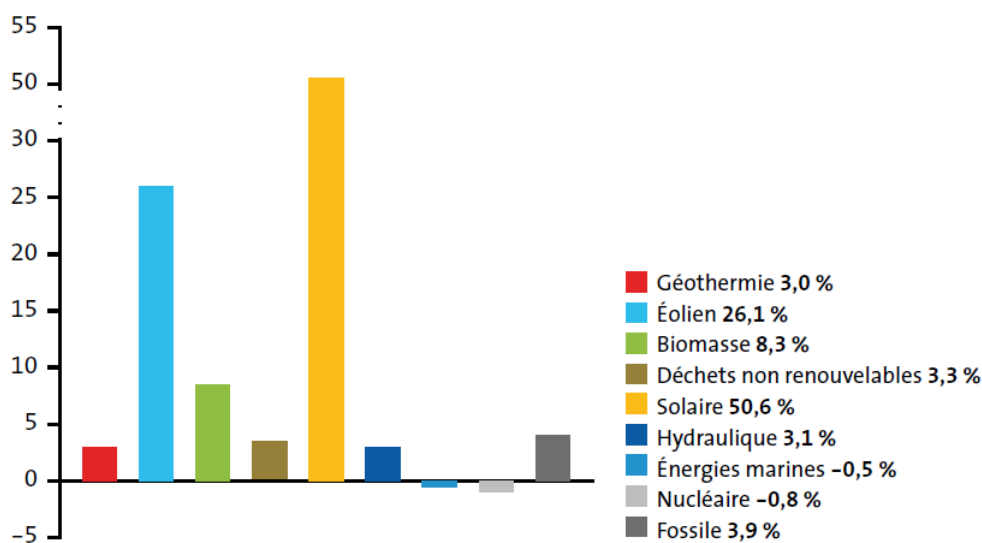


FIGURE 1.2 – Taux de croissance annuel moyen 2002-2012 [Observ, 2014]

Une analyse détaillée filière par filière permet de montrer que c'est la production d'électricité solaire qui affiche le plus fort taux de croissance annuelle sur la période (+ 50,6%). Sur la même période, la croissance de la filière éolienne est également très importante (+ 26,1% par an en moyenne). La croissance de la filière biomasse est plus modérée (+ 8,3%), mais reste plus de deux fois supérieure à celle de la production d'électricité totale. Cette croissance est restée très active entre 20011 et 2012 (+ 6%), dans un contexte de forte croissance de la production d'électricité (figures 1.2).

1.2. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

Au niveau mondial, l'énergie renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale avec une contribution de 78% en 2012. L'énergie éolienne, qui depuis 2009 est devenue la deuxième source d'énergie renouvelable, représente désormais 11,4% du total renouvelable. Elle devance la filière biomasse, qui rassemble la biomasse solide, la biomasse liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables (6,9%). Suivent le solaire (2,2%) qui rassemble les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques, la géothermie (1,5%) et les énergies marines (0,01%)

(figure1.3).

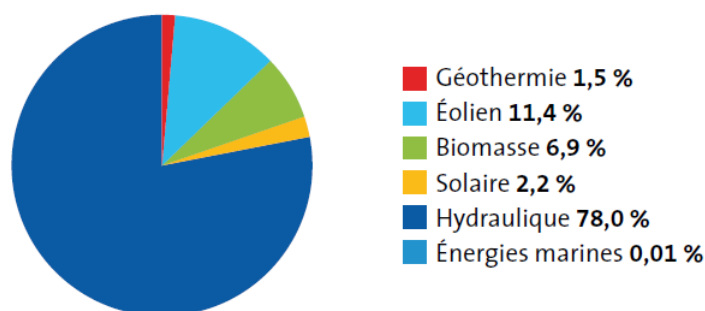


FIGURE 1.3 – Structure de la production électrique d’origine renouvelable - 2012 [Observ, 2014]

Force vive de l’eau, énergie du vent, rayonnement solaire, mais aussi géothermie, chaleur du bois et des autres ressources de la biomasse sans oublier les carburants végétaux et la valorisation des déchets, les énergies renouvelables prennent de multiples formes. Leur développement constitue un enjeu fort dans un contexte d’appétit croissant des ressources à l’échelle mondiale, d’épuisement potentiel des ressources fossiles et de nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Compte tenu de la dynamique actuelle des filières éolienne, solaire et biomasse, la croissance de la production d’électricité renouvelable devrait rester soutenue dans les prochaines années et sa part dans la production mondiale devrait continuer à augmenter.

2. Contexte français

2.1. La production d’électricité en France

Au cours de la période 1960-1973, la croissance de la demande d’énergie est étroitement liée à la croissance économique. Le pétrole, en plein essor, permet de faire face à la fois au développement industriel et au déclin du charbon auquel il se substitue. Entre 1973 et la fin des années 1980, les hausses des prix du pétrole remettent en cause les choix énergétiques, en incitant à maîtriser les consommations et à les orienter vers d’autres sources. Ainsi, la mise en place du programme nucléaire permet un accroissement substantiel de la production nationale d’énergie primaire, passée de 44 Mtep ‘La tonne d’équivalent pétrole’ en 1973 à 139 Mtep en 2011. La production nucléaire est passée dans l’intervalle de 4 Mtep à 115 Mtep, alors que l’extraction d’hydrocarbures (gaz naturel, pétrole) poursuit son déclin et que celle du charbon s’arrête définitivement en avril 2004. Les énergies renouvelables ont longtemps stagné avant de connaître ces dernières années un essor significatif.

En 2012, sur un total de 259,4 Mtep de consommation d’énergie primaire, 8,8 % sont issus de sources renouvelables. Les énergies renouvelables représentent ainsi la quatrième source d’énergie dans la consommation d’énergie primaire, après l’électricité primaire non renouvelable, les produits pétroliers et le gaz (figure 1.4).

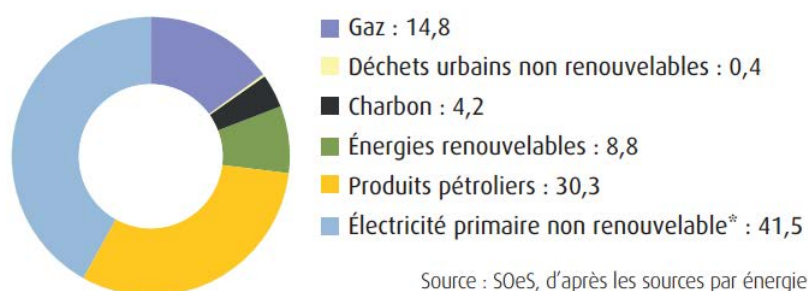


FIGURE 1.4 – Consommation d'énergie primaire par type d'énergie Total : 259,4 Mtep - 2012 [Observ, 2014]

Entre 2011 et 2012, la consommation d'énergie primaire renouvelable a augmenté de 2,5 Mtep après un recul de 0,7 Mtep entre 2010 et 2011. En valeur relative et sur le plus long terme, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire progresse par paliers. Entre 2004 et 2010, cette part n'a cessé de progresser, puis a marqué un fléchissement entre 2010 et 2011 en raison de conditions climatiques exceptionnelles (sécheresse prolongée et températures plus élevées que la référence), avant de renouer avec la croissance. Ainsi, elle passe de 7,6 % en 2011 à 8,8 % en 2012 (figure 1.5).

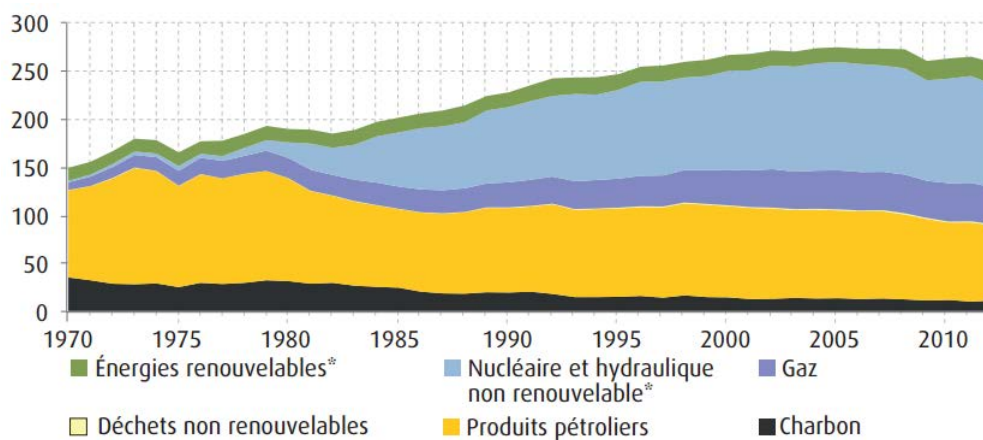


FIGURE 1.5 – Consommation d'énergie primaire par type d'énergie Total : 259,4 Mtep - 2012 [Observ, 2014]

2.2. La production d'électricité d'origine renouvelable en France

La France est riche en ressources énergétiques renouvelables. Avec la première forêt d'Europe occidentale et un fort potentiel hydraulique, éolien et géothermique, elle est en 2011 le second producteur et le second consommateur d'énergies renouvelables en Europe, derrière l'Allemagne.

L'Union européenne s'est fixé l'objectif de satisfaire 20 % de sa consommation finale d'énergie par les énergies renouvelables à l'horizon 2020 ; cette ambition se traduit par une cible de 23 % pour la France.

En 2012, la production primaire d'énergies renouvelables s'élève à 22,4 Mtep. Les principales filières sont le bois-énergie (44,8 %), l'hydraulique (22,4 %), les biocarburants (10,7 %) et les pompes à chaleur (6,2 %).

Entre 2011 et 2012, la production primaire d'énergies renouvelables augmente de 3,6 Mtep (+ 19 %). Cette forte progression intervient après une année 2011 en fort recul, du fait de conditions climatiques exceptionnelles (sécheresse prolongée et températures plus élevées que la référence). Sur un plus long terme, la production primaire d'énergies renouvelables évolue de façon heurtée. En effet, elle est tributaire du niveau de pluviométrie ou des températures hivernales qui influent sur la production des filières les plus importantes telles que le bois-énergie et l'hydraulique. En 2012, la production brute d'électricité renouvelable s'élève à 82,4 TWh. Les principales filières produisant de l'électricité sont l'hydraulique avec 70,0 % de la production brute, et l'éolien 18,1 % (figure 1.6).

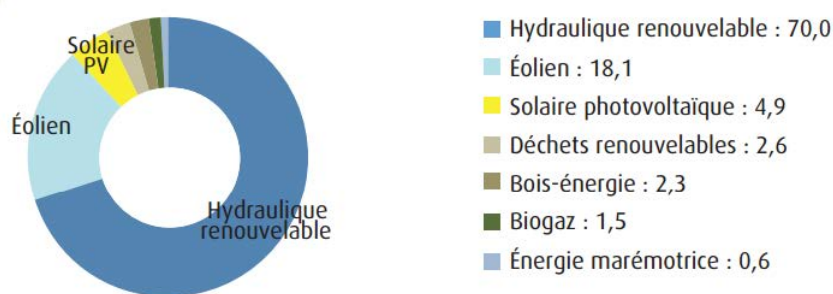


FIGURE 1.6 – Production brute d'électricité renouvelable par filière – Total : 82,4 TWhEn % - 2012 [Observ, 2014]

1. L'énergie hydroélectrique :

L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue depuis longtemps dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Les sites de petites puissances (inférieures à 10 kW) sont des solutions très prisées pour des petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont des grands avantages. Les petites centrales hydrauliques appartiennent souvent à des producteurs indépendants [Paish, 2002].

L'hydroélectricité de petite puissance est avant tout une énergie répondant aux trois critères fixés dans la définition généralement admise pour les énergies renouvelables : pérennité des ressources, respect de l'environnement (moyennant certaines précautions), possibilité de production délocalisée (contribue à une certaine indépendance énergétique).

Le principal avantage énergétique et environnemental de cette énergie est qu'elle n'est pas intermittente, contrairement à l'énergie solaire ou éolienne. La production hydraulique varie bien entendu suivant des cycles saisonniers, les cours d'eau pouvant être diminués l'été ou au contraire renforcés par la fonte de glaciers. Il est important de noter qu'il est plus facile de prévoir à l'avance les débits des

cours d'eau que les vents car on installe en général un bassin de retenue qui permet d'avoir un débit régulier [Salhi et al., 2010]

Après une année 2011 caractérisée par une faible hydraulité, l'hydraulique renouvelable retrouve un niveau plus élevé en 2012, avec une production électrique de 59,8 TWh. La production normalisée reste cependant sur une tendance décroissante (figure 1.7).

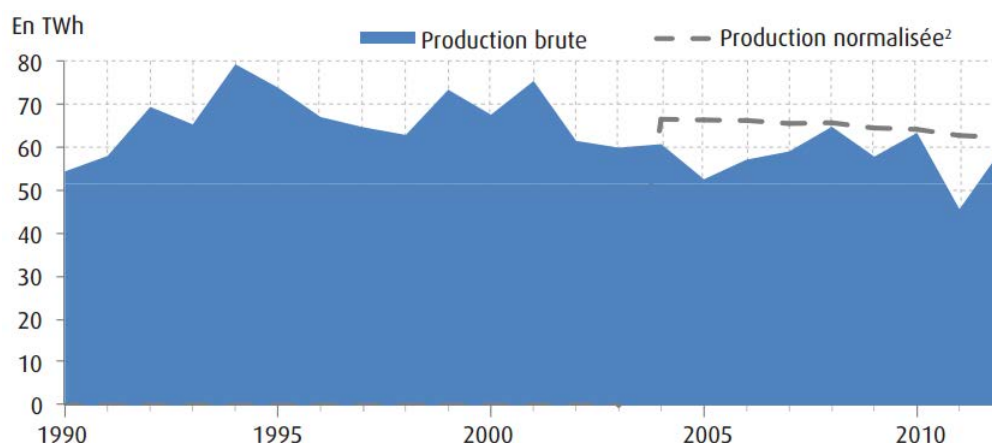


FIGURE 1.7 – Évolution de la production hydraulique brute renouvelable [Observ, 2014]

2. L'énergie éolienne :

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, c'est l'énergie éolienne qui a été exploitée en premier. Pourtant, la production éolienne pose des problèmes difficiles de stabilisation des réseaux à cause des fluctuations naturelles et difficilement prévisibles [Stiebler, 2008].

La ressource éolienne vient du déplacement des masses d'air. Le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres créent une différence de pression et ainsi le déplacement des masses d'air. Le vent ainsi créé permet de faire tourner des pales d'une éolienne qui entraînent une génératrice comme énergie primaire.

En 2012, la production d'électricité éolienne s'élève à 14,9 TWh en données réelles et à 14,2 TWh en données normalisées. Après une croissance rapide sur la période 2005 - 2008, la production électrique éolienne ralentit un peu depuis 2009. Entre 2011 et 2012, la production réelle d'électricité éolienne augmente toutefois de 2,4 TWh, soit de 19 %, grâce à une météorologie favorable (figure 1.8).

En 2012, la production réelle d'électricité éolienne en métropole s'élève à 14 913 GWh, soit plus de 99 % de la production éolienne totale. Depuis l'émergence de la filière, la production d'électricité éolienne n'a cessé de progresser en métropole. La production d'électricité éolienne dans les DOM affiche quant à elle une évolution plus irrégulière. Toutefois, entre 2011 et 2012, la production dans les DOM augmente environ au même rythme qu'en métropole.

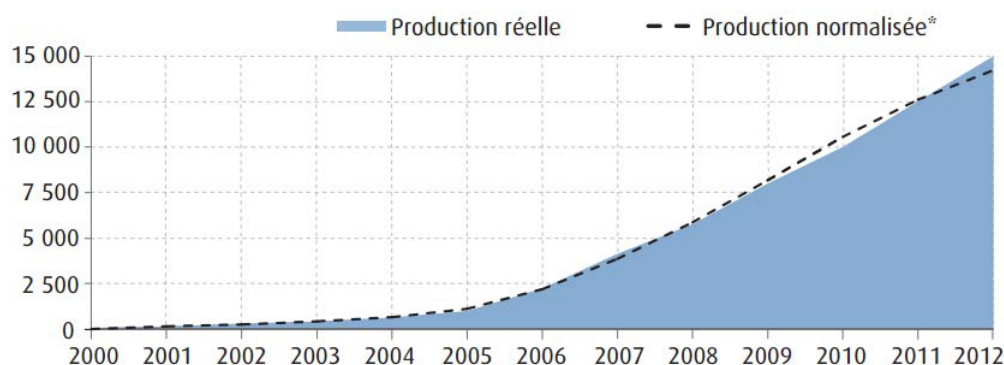


FIGURE 1.8 – Évolution de la production d'électricité éolienne En GWh [Observ, 2014]

3. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique qui peut être exploitée directement après un étage d'adaptation. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de poursuite du point de puissance maximale [Esrasm and Chapman, 2007].

Par ailleurs, la réduction des prix d'installation et l'amélioration du rendement, ont permis le développement de ce type d'installation soit en complément à l'énergie reçue du réseau (pour réduire les dépenses énergétiques), soit pour alimenter des sites isolés dont la consommation énergétique reste raisonnable [Hohm and Ropp, 2003].

En 2012, le solaire photovoltaïque produit 4 390 GWh, dont 91 % en France métropolitaine et 9 % dans les DOM. Entre 2011 et 2012, la production progresse de plus de 2 000 GWh, ce qui équivaut à 88 %. En progression exponentielle depuis son émergence, la production de la filière augmente désormais plus lentement mais à un rythme néanmoins élevé (figure 1.9). Depuis le démarrage de la filière en 2007, les puissances installées ont augmenté jusqu'à atteindre 3110 MW en 2011. En 2012, elles marquent un net ralentissement. Le parc s'accroît de 1 178 MW dont 1150 MW en métropole, contre 1 897 MW dont 1751 MW en métropole l'année précédente.

4. L'énergie solaire thermique :

En 2012, le parc solaire thermique couvre une surface de 2 423 milliers de m^2 dont 73 % en métropole. Entre 2011 et 2012, la surface du parc a augmenté de 10 % sur l'ensemble du territoire, de 11 % en métropole et 8 % dans les DOM (figure 1.10).

5. Potentiel biomasse :

En 2012, la consommation primaire de bois-énergie atteint près de 10 millions

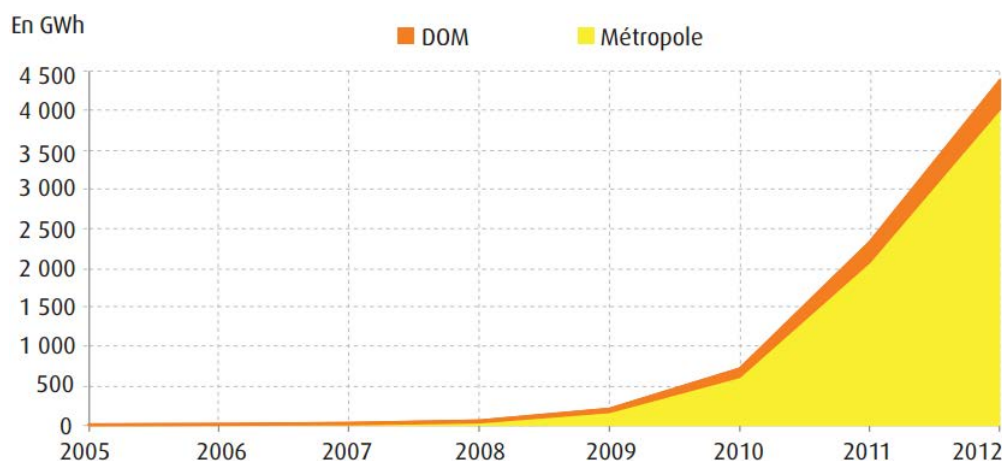


FIGURE 1.9 – Évolution de la production d'électricité solaire En GWh [Observ, 2014]

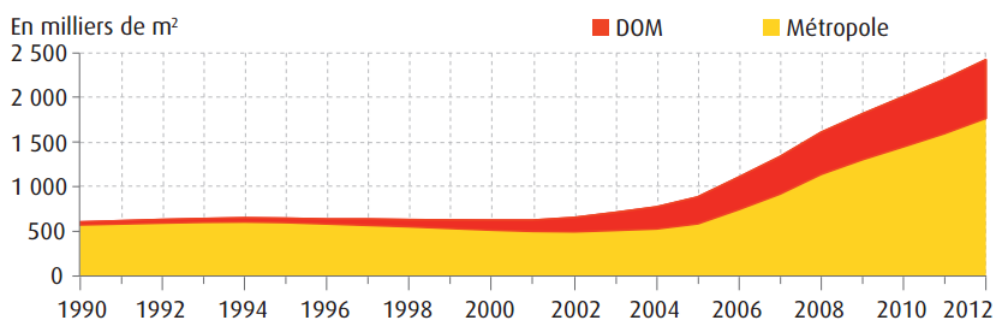


FIGURE 1.10 – Surface du parc solaire thermique [Observ, 2014]

de tep, dont 72 % sont utilisés pour le chauffage résidentiel individuel, 5 % pour le chauffage collectif et le secteur tertiaire et 24 % par l'industrie. Entre 2011 et 2012, la consommation primaire de bois-énergie a augmenté de 16 % et dépasse le niveau de 2010, après le recul enregistré en 2011, du fait de la douceur de l'hiver (figure 1.11).

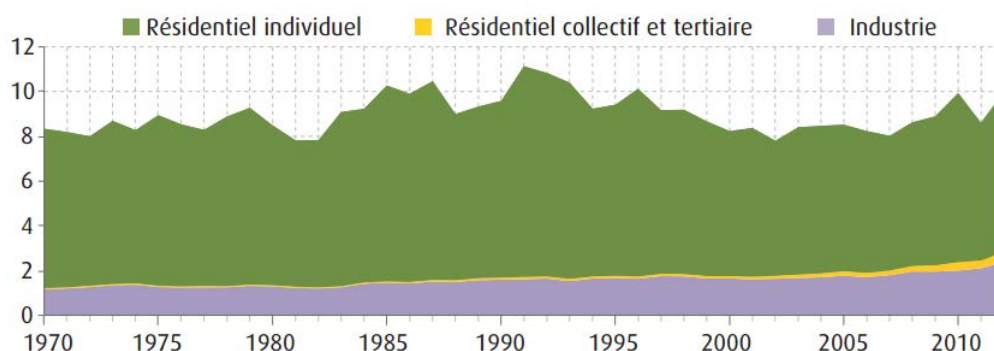


FIGURE 1.11 – Évolution de la consommation primaire de bois-énergie par secteur [Observ, 2014]

Après un bref bilan des ressources énergétiques exploitables, on se concentrera en-

suite sur les systèmes de production éolienne et photovoltaïque, qui sont les premières sources d'énergie renouvelable à exploiter. Dans le cadre de cette thèse, nous ne nous intéressons qu'à l'utilisation de ces sources pour l'électrification, soit des sites isolés soit des sites liés au réseau national Français. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergie renouvelable nous offre une solution prometteuse pour des consommateurs autonomes en respectant l'environnement. Enfin, nous finirons ce chapitre en précisant la problématique que nous avons définie dans cette thèse qui est l'optimisation de dimensionnement pour la production de l'électricité pour sites isolés ou liés au réseau en utilisant la logique floue.

3. Conclusion

Dans cette section, nous avons brièvement présenté l'intérêt des énergies renouvelables pour réduire les gaz à effet de serre et pour diminuer l'échauffement de la planète. Cinq sources d'énergie renouvelable, qui produisent directement l'électricité, sont ainsi présentées. Parmi ces sources renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne ont connu des progrès immenses et deviennent des sources renouvelables prometteuses dans l'avenir. De plus, leur maintenance relativement facile.

C'est donc ces deux technologies que nous avons décidé d'étudier dans cette thèse. Notre but est de contribuer au développement et à l'optimisation d'une installation utilisant ces deux sources pour l'électrification d'un site isolé. Dans les sections suivantes, on va détailler les concepts de ces deux sources, puis définir la problématique de cette thèse.

II. Énergie photovoltaïque

1. Définition

L'effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Antoine Becquerel dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Plus généralement, on qualifie de photoélectriques tous les phénomènes électriques provoqués par l'action de la lumière sur la matière qui provoquent une éjection d'électrons du matériau : l'émission photoélectrique, la photoconductivité, l'effet photovoltaïque, et à ce dernier est également associé, par le choix judicieux d'un matériau adapté, l'apparition de forces électromotrices, ce qui permet une conversion directe de l'énergie du rayonnement en énergie électrique [Benoît et al., 2012].

2. La photopile

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière. Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte

un atome sur la partie négative de cette diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu (cc), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile [Minh et al., 2013]. Dans cette section, nous présentons le principe de l'énergie photovoltaïque, les éléments d'un système photovoltaïque et les différentes technologies utilisées.

2.1. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque grâce à un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau (figure 1.12). La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule photovoltaïque de fonctionner comme un générateur. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et de son vieillissement [Pastor, 2006].

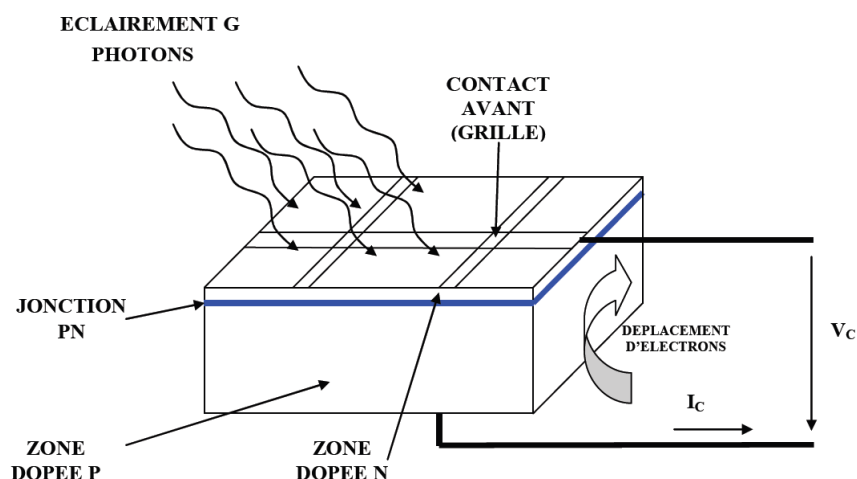


FIGURE 1.12 – Cellule élémentaire photovoltaïque

3. Le module photovoltaïque

Pour un ensoleillement homogène et une même température, en associant des cellules photovoltaïques identiques en série on augmente la tension (la tension résultante

est la somme des tensions de chaque cellule). Si on les associe en parallèle, on augmente le courant résultant. Les modules photovoltaïques sont constitués d'un assemblage série/parallèle de cellules élémentaires. Un champ photovoltaïque ou champ solaire est constitué d'un ensemble de modules connectés en série et/ou en parallèle. On protège les modules avec des diodes bypass afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci.

La caractéristique d'un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule et que l'ensoleillement et la température soient uniformes.

3.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série (figure 1.13)

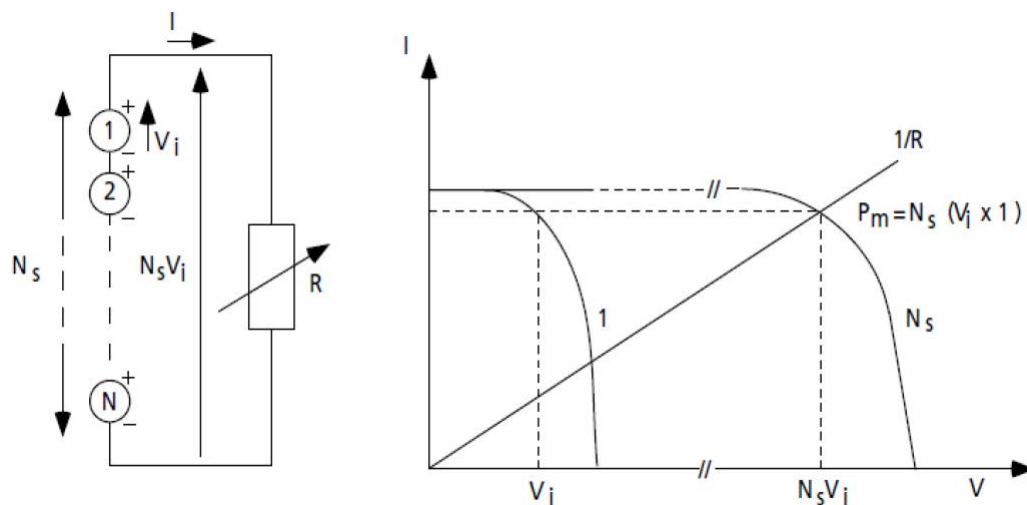


FIGURE 1.13 – Cellules identiques en série

3.2. Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche (figure 1.14).

Comme pour la cellule simple, les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque dépendent de la température, de l'ensoleillement et de façon générale, de son environnement (orientation et inclinaison, état de surface, ombres partielles).

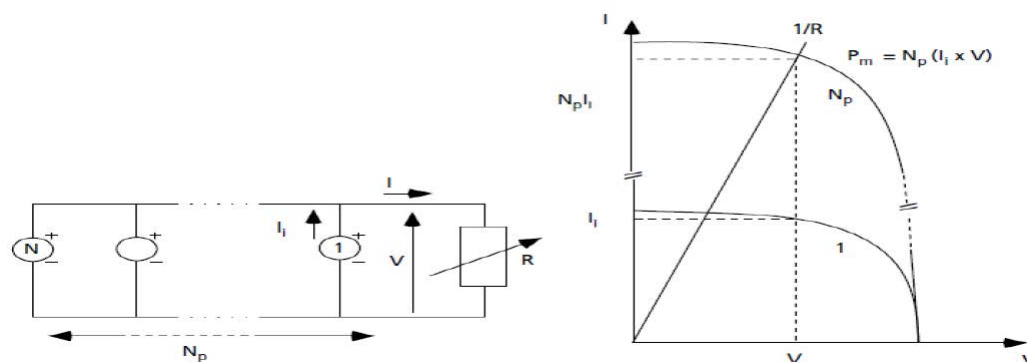


FIGURE 1.14 – Cellules identiques en parallèles

4. Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté un système de production photovoltaïque. Le contexte nous a permis de présenter le principe de la conversion photovoltaïque, les propriétés d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque en fonction de la température et de l'ensoleillement.

III. Énergie éolienne

1. Définition

Un aéro-générateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure 1.15).

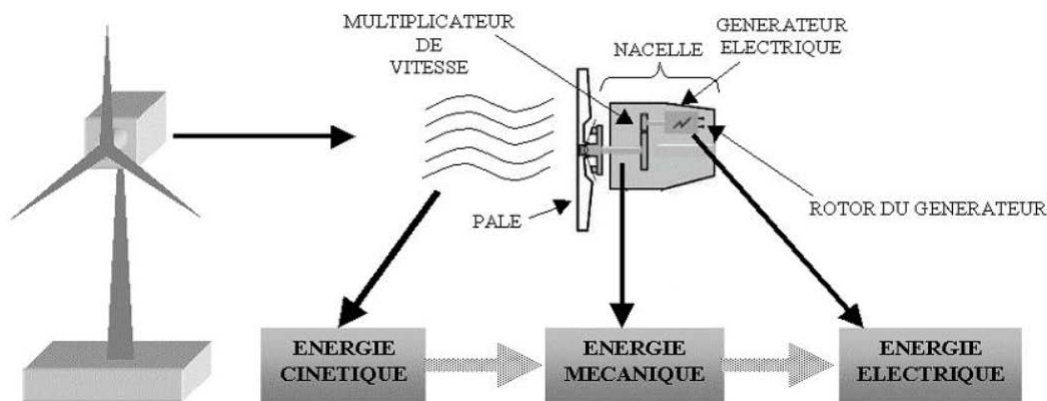


FIGURE 1.15 – Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne

2. Conversion cinétique - mécanique

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique. Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Elles exploitent donc la différence de pression qui créent une force de portance pour mettre en rotation la turbine et ainsi extraire une partie de l'énergie cinétique du vent. Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal [Hau, 2006] (figure 1.16).

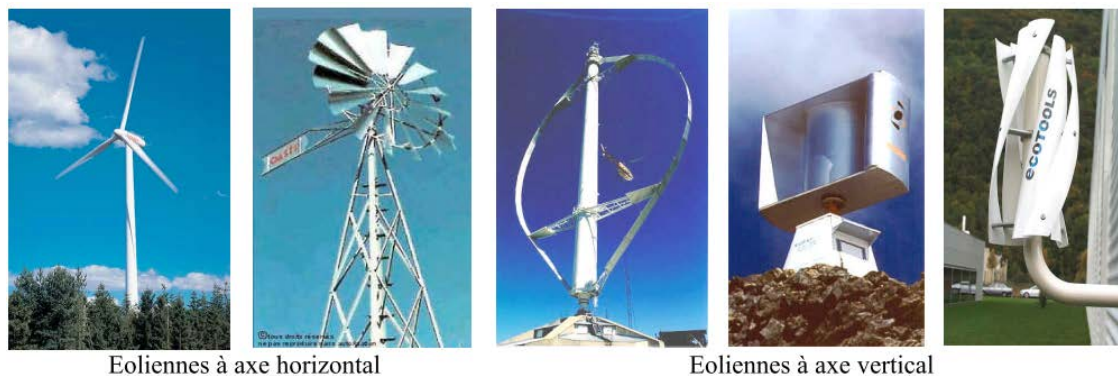


FIGURE 1.16 – Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage et un coefficient de puissance relativement élevé.

Selon son nombre de pales, une turbine éolienne à axe horizontal est dite mono-pale, bipale, tripale ou multi-pales. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité et les pertes aérodynamiques par poussée sont minimales. Cependant, un contrepoids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela. Tout comme les rotors mono-pales, les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour. Donc, pratiquement toutes les turbines éoliennes installées sont du type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement [Stiebler, 2008].

Les pales de l'éolienne balaient le champ des vitesses du vent qui varie dans le temps et autour du disque rotorique, modifiant ainsi localement la pression et la vitesse de l'air. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active de la voilure, on peut calculer la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active de l'éolienne.

Il paraît évident que plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus petite sera la vitesse du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne.

Si nous tentions d'extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à une vitesse nulle.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible présente un maximum défini par la limite de Betz. Elle stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance.

3. Conversion mécanique - électrique

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système éolien qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances ($< 20kW$), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à $2MW$ environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [Stiebler, 2008].

3.1. Générateur asynchrone

Le générateur asynchrone à cage d'écurieil est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissances en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles ont besoin de moins d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les éoliennes de grande puissance, la vitesse de rotation est peu élevée. Il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct donc il est nécessaire d'utiliser un multiplicateur mécanique de vitesse entre la turbine et la machine asynchrone. Une solution consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse [Hau, 2006].

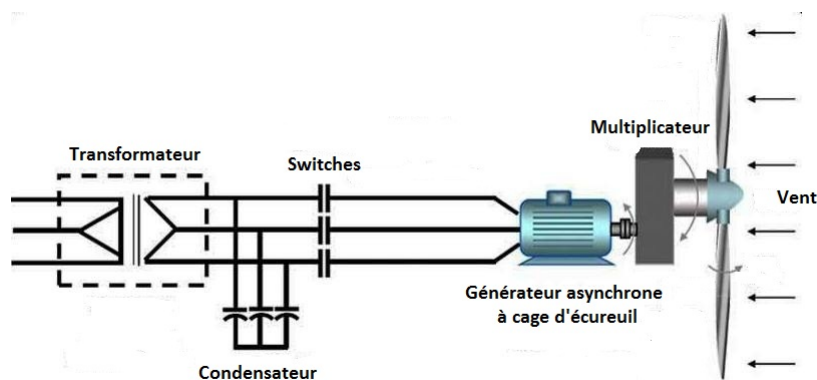


FIGURE 1.17 – Générateur asynchrone à cage d'écurieil

Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance [Eriksen et al., 2005].

3.2. Générateur asynchrone à double alimentation

Une des configurations en forte croissance pour les turbines éoliennes est le générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Le stator du générateur est directement couplé au réseau par un transformateur. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement.

Le câblage du rotor (couplage du rotor et l'électronique de puissance associée) permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de celui-ci. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor [Fernandez et al., 2008].

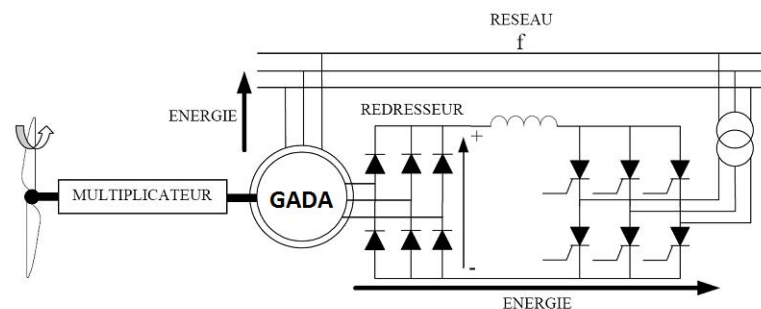


FIGURE 1.18 – Générateur asynchrone à double alimentation

Ces machines sont plus complexes que les machines asynchrones à cage d'écureuil parce que la présence du système électronique de puissance et de système à bagues et balais demandent des commandes compliquées et des entretiens réguliers, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de nombreuses éoliennes utilisent ce type de machines [Ekanayake et al., 2003].

3.3. Générateur synchrone à rotor bobiné

Dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs performances sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Cependant, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, cela nous oblige à utiliser un convertisseur de fréquence. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable [Hau, 2006].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du

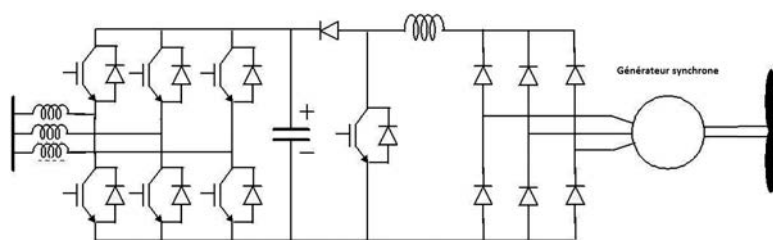


FIGURE 1.19 – Générateur synchrone (à rotor bobiné ou à aimant permanent)

réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup trop rigide. Des dispositifs de puissance s'imposent pour toutes les applications utilisant ce type de machines. Contrairement aux génératrices asynchrones à double alimentation, la chaîne de conversion placée sur le stator doit être dimensionnée pour la totalité de la puissance du système de production [Hughes, 2006].

3.4. Générateur synchrone à aimant permanent

Ces dernières années, avec le développement des matériaux magnétiques, la production de machines synchrones à aimants permanents devient compétitive. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. La caractéristique d'auto-excitation du générateur synchrone à aimant permanent lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de production d'énergie électrique du type éolien [Ackermann, 2006]. Dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

Elles permettent de produire un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation (qui varie elle-même avec la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). Ainsi, un matériel électrique conçu pour fonctionner à la fréquence du réseau ne peut pas être connecté directement à l'alternateur d'une éolienne. Il est nécessaire de passer par un convertisseur de fréquence, en général, par un redresseur puis un onduleur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient économique, ce qui en fait un concurrent des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants permanents. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles. La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une

optimisation énergétique efficace [Belakehal et al., 2009].

3.5. Choix du générateur

Après un bilan des machines électriques pour des éoliennes, les générateurs à aimant permanent se trouvent adaptés pour une éolienne de petite puissance ($< 20kW$). Ils sont plus légers que les autres types de générateurs qui utilisent un enroulement de cuivre autour d'un noyau magnétique pour créer le champ magnétique et présentent un bon rendement. Le principal avantage des alternateurs à aimants permanents réside dans leur coût relativement faible, les aimants sont moins coûteux que les bobinages en cuivre dans la gamme de puissance des petites éoliennes. Il y a également d'autres avantages pour l'utilisateur, comme le freinage dynamique et la production d'un courant alternatif plutôt que continu, ce qui représente des économies d'installation.

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années. Dans le contexte de l'électrification des sites isolés, nous avons choisi ce type de machine pour la production de l'énergie éolienne.

3.6. Vitesses fixe et/ou variable

Les systèmes éoliens à vitesse fixe utilisent souvent un générateur asynchrone à cage d'écureuil. Ils fonctionnent typiquement à une fréquence fixe, imposée par le réseau auquel ils sont connectés. Les principaux avantages de cette technologie sont leur robustesse et leur faible coût notamment dû à l'utilisation de machines standards. Le fait de travailler à fréquence fixe et donc, à vitesse de rotation presque fixe, implique qu'il n'y a qu'une seule vitesse de vent pour laquelle l'énergie disponible est correctement exploitée. Pour les autres vitesses de vent, la capture d'énergie se fait de façon non-optimale. Par contre, le coût de maintenance essentiellement imputé au multiplicateur est élevé et on ne peut pas contrôler l'énergie réactive. Par ailleurs la connexion directe de l'enroulement statorique de la génératrice au réseau entraîne une très forte sensibilité lors de la présence de défauts sur celui-ci [M. Dali and Roboam, 2008].

La puissance éolienne résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent. De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable pour les systèmes éoliens sur le plan énergétique, y compris dans les petites éoliennes où le sur-coût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglages supplémentaires) est compensé par le surplus de production [Hong and Lee, 2010], [Mittal et al., 2009], [Wang and Chang, 2004], [Huynh et al., 2011].

Les systèmes à vitesse variable utilisent des convertisseurs statiques qui permettent de transformer une tension issue du générateur à fréquence et amplitude variables en une tension de fréquence et d'amplitude fixes définies par le réseau ou le système électrique qu'ils alimentent. Ils présentent donc un coût d'installation plus élevé mais le fait de convertir plus d'énergie leur permet de produire à des coûts inférieurs [Abo-Khalil et al., 2004], [Pundaleek B. H. and G., 2010].

4. Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté un système de production d'énergie éolienne. La conversion cinétique - mécanique au niveau de la turbine éolienne et la conversion mécanique - électrique au niveau du générateur sont aussi détaillées.

IV. Systèmes de stockage

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en quantité modérée pour un coût raisonnable. Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance. Il y a plusieurs formes de stockage d'énergie possibles comme la batterie, les volants d'inertie ... Dans le cas de stockage par pompage d'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie [Ibrahim et al., 2008]. Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante [Faure, 2003]. L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur.

1. Par voie électrochimique

1.1. Les batteries

Le stockage d'énergie le plus utilisé est la batterie. Toute batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (figure 1.20). La capacité énergétique de la batterie (exprimée en wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

Les paramètres électriques suivants sont généralement employés pour caractériser une batterie :

- La capacité nominale q_{nom} est le nombre d'ampères-heures (Ah) qui peut être extrait de la batterie, dans des conditions de décharge prédéterminées.

- L'état de charge SOC (State-of-charge) est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominale : $SOC = q/q_{nom}$ ($0 < SOC < 1$). Si $SOC = 1$, la batterie est totalement chargée si $SOC = 0$, la batterie est totalement déchargée.

- Le régime de charge (ou décharge) est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée). Il est exprimé en heures. Par exemple, pour une batterie de $150Ah$ déchargée à $5A$, le régime de décharge est $30h$.

- La durée de vie est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut

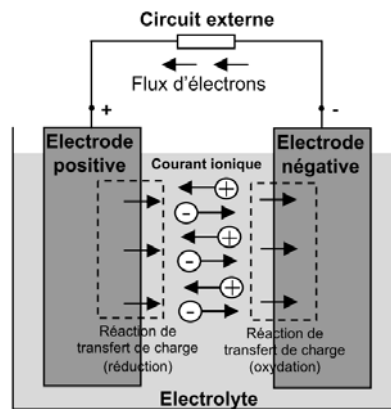


FIGURE 1.20 – Cellule électrochimique de base

soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale.

Le mode de stockage d'énergie électrique privilégié actuellement dans notre vie courante reste l'accumulateur. Qu'il s'agisse de téléphones portables ou de voitures, les batteries sont très largement répandues. La technologie est basée sur le concept chimique de pile : on accumule de l'énergie chimique. Fondamentalement, l'élément de base d'une batterie est composé de deux électrodes, jouant les rôles d'anode et cathode, ainsi que d'un électrolyte, en contact avec les électrodes, permettant la circulation des ions, et donc la création d'un courant. Parmi les nombreuses filières actuellement développées :

- Les batteries au plomb, utilisées couramment pour alimenter des installations ne pouvant supporter des coupures d'alimentation électrique (installation photovoltaïques ou hybrides des sites isolées).
- Les batteries au nickel-cadmium, largement utilisées sur tous les véhicules électriques. Cependant, le principal défaut de cette filière réside dans l'utilisation de Cadmium, métal lourd ! Il n'existe pas, malgré tout, de restrictions au niveau européen, compte tenu de la pression exercée par les industriels.
- Toutes les filières dérivées des batteries au lithium : lithium-ion, lithium polymères, lithium-métal-polymères.

1.2. Les accumulateurs à circulation

Ceux-ci fonctionnent sur le même principe que les piles précédemment présentées, à ceci près que l'électrolyte est circulant, et donc, qu'il n'y a pas création de composés solides. Les composés chimiques responsables du stockage sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. De plus, cette technologie ne nécessite pas de substances très toxiques ou très réactives.

1.3. La pile à combustible

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est le même que celui d'une pile traditionnelle. En effet, quand l'intérêt pour la pile à combustible s'est réveillé vers la fin des années 1980, les développements ont porté bien davantage sur la pile que sur le combustible. Aujourd'hui, du fait des progrès technologiques obtenus sur la pile, force est de constater qu'un déséquilibre inverse est apparu et que l'on est moins avancé sur le combustible que sur la pile. Minh Huyng 2013 optimisation

2. Par voie électrostatique

Le principe de base d'un super condensateur est le suivant : un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) est placé entre deux électrodes conductrices à très grande surface spécifique, c'est-à-dire à très grande surface de contact entre l'électrode et l'électrolyte. En général, les matériaux utilisés pour les électrodes sont des grains de carbone (charbon activé, fibres de carbone, aérogels de carbone...) ou des polymères conducteurs. Lorsqu'on applique un champ électrique entre les électrodes, des ions positifs et négatifs se déplacent dans l'électrolyte et forment à la surface de chaque électrode une couche de charges électriques, appelée double couche. Comme cette surface est très grande, la quantité de charges accumulées est bien plus importante que dans le cas de condensateurs classiques. L'énergie volumique stockée est d'ailleurs comprise entre 1 et 10 kWh/m^3 contre 0,1 à 1 kWh/m^3 pour les condensateurs ou hyper-condensateurs. Comme il n'y a pas de réaction chimique à la surface des électrodes, la longévité (ou cyclabilité) est beaucoup plus élevée ici (100 000 à 500 000 cycles de charge/décharge) que pour la voie électrochimique étudiée précédemment (300 à 1500 cycles). Cependant, pour obtenir des systèmes exploitables, il faut mettre en série un grand nombre de cellules pour aboutir à une tension de stockage élevée.

3. Par voie électromagnétique

Un des supports de la filière de stockage électromagnétique est la bobine supraconductrice. Le principe de fonctionnement est assez simple : un courant parcourant un bobinage engendre un champ magnétique, auquel est associée une énergie magnétique, fonction de l'inductance de la bobine et du volume magnétique. La particularité de cette bobine est qu'elle a une résistance nulle au-dessous d'une certaine température critique, caractéristique du matériau. En conséquence, si le bobinage est fermé, le courant se maintient et il n'y a pas de dissipation d'énergie par effet Joule : celle-ci reste stockée sous forme magnétique.

4. Par voie mécanique

Le stockage sous forme d'énergie gravitaire :

Ce type de stockage existe principalement à l'heure actuelle sous la forme de Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Ces stations permettent de pomper et de turbiner de façon cyclique la même eau entre un bassin supérieur et un bassin inférieur.

En général, on pompe en utilisant l'électricité bon marché des heures creuses (comme par exemple la nuit en été), et on turbine pour produire de l'électricité d'une valeur plus élevée aux heures de pointe.

Le stockage sous forme de pression :

Dans ces installations, l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des nappes aquifères, des cavernes ou des cavités salines souterraines, le poids des terrains au dessus permettant de résister à la pression de l'air. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel ou de fioul, puis détendu dans une turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée.

Le volant d'inertie :

Les volants d'inertie ont été employés historiquement dans les transports en commun. Leur principe de fonctionnement est le suivant : un disque ou un cylindre tournant est accéléré par un moteur/générateur électrique, lorsque l'on désire stocker de l'énergie électrique et freiné par ce même moteur/générateur (fonctionnant dans ce cas en générateur), lorsque l'on désire récupérer l'énergie stockée. Les frottements devant être limités le plus possible, le volant est placé dans une enceinte sous vide et sur des paliers à suspension magnétique. La durée de vie du système est quasi illimitée ($> 10000cycles$). L'absence de lubrifiant permet aussi de travailler dans des gammes de températures et de pression assez larges.

5. Conclusion

Malgré le problème de capacité et de durée de vie, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée pour le système de stockage pour son prix très concurrentiel et sa robustesse. C'est pour ces raisons que nous avons choisi dans cette thèse d'utiliser des batteries plomb-acide pour le système de stockage.

V. Utilisation de l'énergie renouvelable

Depuis quelques années, il n'est plus nécessaire d'installer les systèmes de production d'énergie renouvelable précisément sur le lieu d'utilisation de l'énergie. Ils sont maintenant utilisés pour générer de l'énergie électrique qui est transférée par un réseau électrique sur une distance plus ou moins grande vers les utilisateurs. Pourtant, les systèmes d'énergie renouvelable individuels qui fournissent de l'électricité à de petites communautés sont assez répandus. Ils sont adaptés aux endroits dont la connexion au réseau n'est pas rentable, ou même impossible. On présentera le principe de ces deux applications principales de l'énergie renouvelable, notamment pour des éoliennes et des panneaux photovoltaïques.

1. Systèmes raccordés au réseau

Dans le domaine éolien, l'installation d'une ou quelques turbines éoliennes par des clients privés ou industriels est le premier champ d'application. L'installation distribuée de turbines éoliennes est faite presque exclusivement en connexion avec le réseau global. La consommation du client est enregistrée par un compteur et la puissance produite par l'éolienne est injectée au réseau public et comptabilisée à travers un autre compteur. La facturation est faite séparément, selon la consommation et la production d'énergie [Hau, 2006].

Même en prenant en compte les plus grandes turbines éoliennes actuelles, d'une puissance nominale de quelques mégawatt, la puissance délivrée par une seule turbine reste une quantité petite par rapport à celle d'une centrale conventionnelle. Par ailleurs, dans la majorité des pays, les zones proposant des vitesses de vent techniquement utilisables sont restreintes à quelques régions seulement. Ceci nécessite l'assemblage dans ces lieux d'autant d'éoliennes que possible, indépendamment de la demande énergétique locale. De cette façon, apparaissent les parcs ou fermes éoliennes, qui consistent en une concentration de nombreuses éoliennes en groupes organisés dans l'espace considéré et inter-connectées. Ce groupement offre de nombreux avantages techniques. De plus, d'un point de vue économique, il est plus intéressant en termes de coût d'installation et de raccordement au réseau [Tsili and Papathanassiou, 2009].

Pour l'énergie photovoltaïque, son utilisation est très répandue dans les bâtiments. La plupart des bâtiments sont raccordés au réseau électrique, l'électricité est disponible en permanence à un niveau de puissance choisi par le consommateur. L'installation d'un système d'énergie renouvelable peut améliorer le bilan énergétique du propriétaire. Le bilan sert souvent à réduire la consommation afin de faire des économies d'énergie du bâtiment. Celui-ci devient actif et produit de l'énergie [Luque and Hegedus, 2010].

2. Systèmes autonomes

De plus en plus d'applications ne peuvent pas être reliées au réseau à cause de la complexité de la connexion à celui-ci ou du coût d'installation. Pour autant, il est souvent indispensable d'avoir accès à l'électricité afin d'assurer quelques services de base comme l'éclairage ou l'alimentation d'un dispositif électrique. Ces sites peuvent alors être alimentés en électricité par l'énergie renouvelable [Luque and Hegedus, 2010].

Durant les dernières années, d'importants efforts ont été effectués pour l'utilisation de l'énergie renouvelable dans des systèmes de puissance locaux et régionaux à travers l'intégration de systèmes de distribution de petite et moyenne tailles. De nombreux travaux sur le développement des systèmes éoliens autant que photovoltaïques pour les sites isolés ont été réalisés [Stiebler, 2008], [M. Dali and Roboam, 2008], [Kalantar and Mousavi, 2010], [Bopp et al., 1998].

De ce fait, les applications autonomes sont classées en deux familles :

- Applications "professionnelles" : relais de télécommunication, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement...
- Applications pour des sites isolés : habitat loin du réseau, refuges...

Pour les systèmes isolés, l'objectif est d'obtenir un équilibre de la production énergétique en réglant la tension et la fréquence. Pour obtenir une tension à une amplitude et une fréquence stables, diverses méthodes sont utilisées, comme les condensateurs synchrones, des groupes de batteries contrôlables, mécanismes de stockage, des convertisseurs de puissance et des systèmes de commande [Nema et al., 2009].

3. Conclusion

Aujourd'hui, les systèmes individuels qui fournissent de l'électricité à des petites communautés sont de plus en plus nombreux. La tendance actuelle est de développer des systèmes commandés de plus en plus efficaces, utilisant des structures de conversion électronique pour augmenter le rendement d'exploitation. Dans ce contexte, l'apport envisagé de notre thèse est de contribuer à la conception d'un système de production hybride éolienne/photovoltaïque pour des sites isolés de moyenne puissance (moins de 100 kW) où l'expansion du réseau est difficile ou trop coûteuse.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, un bilan des principales formes d'énergies disponibles a été présenté. Les caractéristiques principales des énergies renouvelables les plus utilisées à l'heure actuelle ont été également décrites, puis on s'est concentré sur les technologies photovoltaïque et éolienne. Les principes et éléments constitutifs du panneau photovoltaïque et de l'éolienne, avec une partie spécialement consacrée aux systèmes isolés, ont aussi été présentés. Dans le chapitre suivant, nous intéressons au dimensionnement d'une installation hybride utilisant les énergies solaire et éolienne.

Chapitre 2

Modélisation

I. Dimensionnement du système d'énergie hybride

1. Introduction

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise au moins une où plusieurs sources de production d'énergies renouvelables avec la possibilité d'ajouter des sources de production d'énergie classique. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [Nelson et al., 2002] et [Baring-Gould et al., 2003] .

Le bénéfice potentiel du système hybride relève de la complémentarité des deux sources d'énergie afin de minimiser le coût en optimisant leurs dimensions. Dans le but de mettre en relief cette complémentarité, Il est alors nécessaire de connaître la contribution de chaque source (photovoltaïque et éolienne) pour l'alimentation de la charge afin de faire ressortir la variante optimale, tenant compte du facteur économique. L'objectif principal de notre étude est de dimensionner et optimiser un système hybride photovoltaïque-éolien, en introduisant différents scénarios.

2. Configuration du système d'énergie hybride

Pour le système d'énergie hybride (photovoltaïque-éolienne) il y a deux principales configurations : architecture à bus CC [Wichert, 1997] et architecture à bus CA [Gergaud, 2002].

2.1. Architecture à bus CC

Cette technologie est née du besoin de coupler des consommateurs CA avec des générateurs CC et, de plus, de charger la batterie du côté CC (à ce propos, voir la figure 2.1). Ces configurations d'installation servent à l'alimentation de consommateurs éloignés. Dans ce cas la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus CC. Ainsi les systèmes de production à CA utilisent des redresseurs [Gaztanaga, 2006].

Avantages

- Le système de commande est relativement simple qui constitue un grand avantage pour une telle architecture.

Inconvénients

- Les désavantages sont principalement le rendement faible à cause de batteries et des pertes dans les convertisseurs

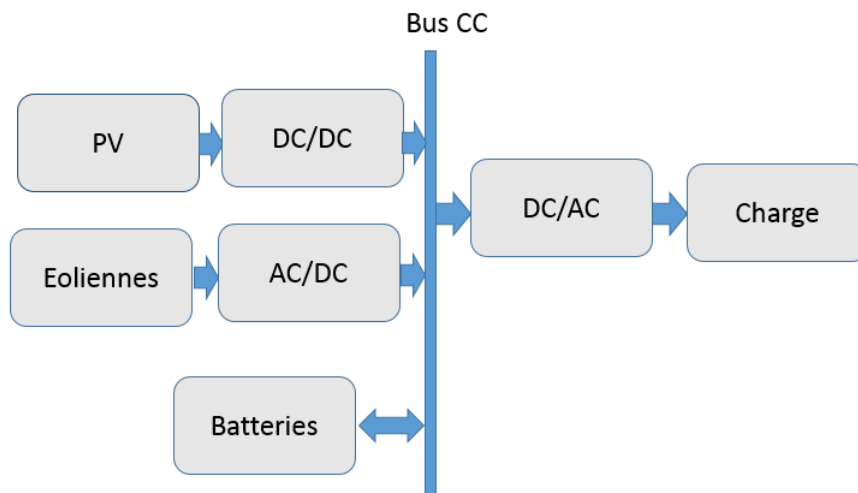


FIGURE 2.1 – Configuration de SEH à bus CC [Vechiu, 2005]

2.2. Architecture à bus CA

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA figure 2.2 permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres.
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur)

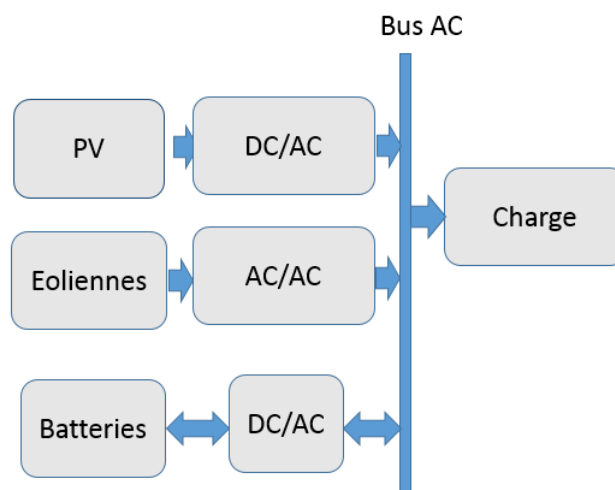


FIGURE 2.2 – Configuration de SEH à bus AC [Vechiu, 2005]

Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande
- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (Problème de synchronisation).

Nous choisissons la configuration de bus CC dans la suite de la thèse car elle est moins compliquée et plus rentable

3. Système de conversion d'énergie hybride

Ce système est caractérisé par deux sources énergétiques (photovoltaïque et éolienne) : le générateur photovoltaïque (PV) est connecté à la charge par un convertisseur DC/DC commandé en MPPT (Maximal Power Point Tracking)[Minh et al., 2013], et la turbine éolienne (WT) entraîne un générateur à aimants permanents (GSAP) qui lui-même est connecté à la charge par un convertisseur AC/DC commandé. Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme l'indique la figure 2.3.

La configuration du système hybride photovoltaïque-éolien dépend évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que des contraintes de l'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesures et une analyse préalable des spécificités du site qui seront étudiées dans ce chapitre.

Les performances des panneaux photovoltaïques et des aérogénérateurs sont directement corrélées aux données climatiques qui sont en principe l'irradiation solaire et la vitesse du vent. Pour un profil de charge donné, la taille du système augmente quand les ressources climatiques sont faibles. Généralement, la grandeur de la demande en

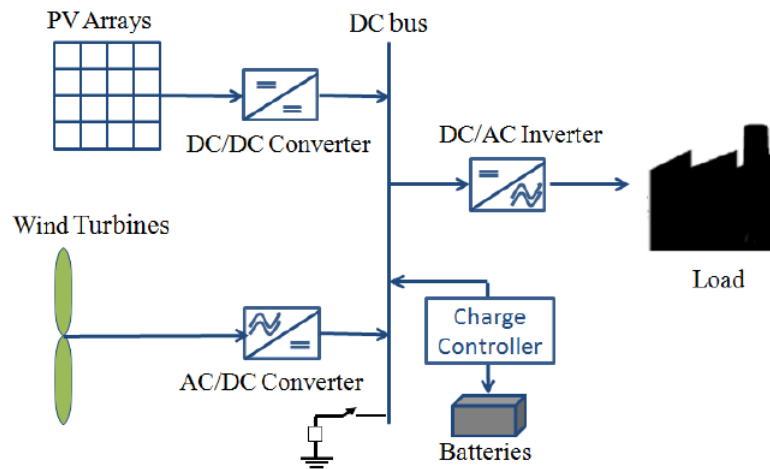


FIGURE 2.3 – Schéma de principe du système hybride photovoltaïque- éolien

énergie est une fonction variable du temps. Donc une étude du potentiel de gisement solaire et de gisement éolien est indispensable dans la suite de la thèse.

II. Énergie photovoltaïque

1. Introduction

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisations, et les données relatives aux équipements. Pour arriver à la modélisation de la partie de production d'énergie (le générateur photovoltaïque) il est nécessaire de modéliser les rayonnements solaires inclinés sur ce dernier.

2. Modélisation du rayonnement solaire

Pour calculer le rayonnement solaire reçu au niveau du sol il est possible d'utiliser un modèle de calcul basé sur des méthodes semi empiriques [Moumami et al., 2006]. Les paramètres du modèle dépendent :

- de la région définie par la latitude, la longitude et l'altitude.
- de la saison de l'année et l'heure du jour.
- L'albédo du site d'implantation.

La méthode de calcul est divisée en deux parties : la première calcule les paramètres qui sont indépendants de l'inclinaison de la surface de captation, comme le rayonnement direct et diffus sur un plan horizontal, l'angle zénithal du soleil (90 moins l'angle d'élévation du soleil), la deuxième calcule le rayonnement incident sur une surface inclinée.

2.1. Calcul de la position du soleil

Les radiations à faible longueur d'onde ($0.28 - 5\mu m$) peuvent être séparées en 3 composants : le rayonnement direct, le plus important, le rayonnement diffusé par l'atmosphère et qui dépend de sa composition, et le rayonnement réfléchi par le sol [Gates, 1980]. Le rayonnement global, somme de ces trois composantes, est déterminé par trois groupes de facteurs : les relations géométriques entre le soleil et la surface de la terre, l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère, et les facteurs topographiques [Hofierka and Suri, 2002]. Des formules astronomiques permettent de calculer les relations géométriques entre le soleil et la terre en fonction de la localisation et du moment. Le facteur d'atténuation atmosphérique est conditionné par la présence de gaz, et de particules solides ou liquides, qui sont fonction de l'épaisseur de l'atmosphère et donc de l'altitude. Les facteurs topographiques induisent de fortes variations à l'échelle locale du fait des variations de pente et d'exposition, qui modifient l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Les effets de masque de versant opposés peuvent également jouer un rôle important. Ils peuvent être simulés à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Nous avons choisi de prendre en considération l'atténuation par les nuages de façon séparée, permettant le calcul du rayonnement sous ciel clair ou sous ciel nuageux, et éventuellement d'intégrer différentes sources de couverture nuageuse [Kasten and Czeplak, 1980]

L'altitude

La position du soleil est indispensable pour le dimensionnement des systèmes d'énergie solaire. Les deux angles : altitude solaire α ou élévation du soleil, et azimut β solaire : définissent la position du soleil [Gates, 1980].

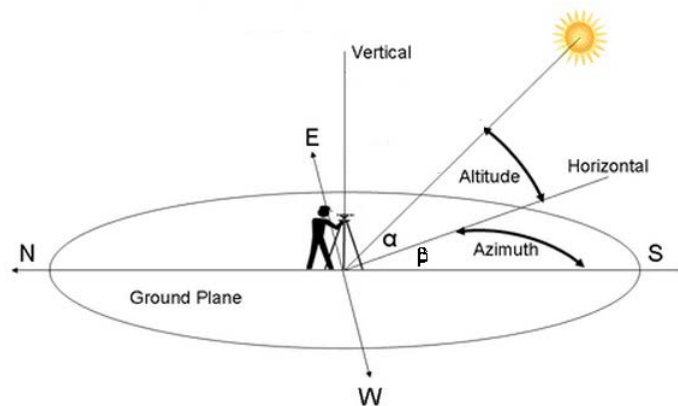


FIGURE 2.4 – La position du soleil peut être décrite par son angle α d'altitude et β angle d'azimut.

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\eta) \cos(\delta) \quad (2.1)$$

avec φ la latitude pour chaque cellule, η étant l'heure solaire, δ la déclinaison solaire, l'angle de déclinaison solaire est formé par la droite reliant la terre au soleil et le plan

équatorial (positif vers le nord)

L'élevation du soleil et l'azimut solaire dépendent de l'emplacement géographique de l'observateur, la date, l'heure et le fuseau horaire. La position du soleil est fortement influencée par l'angle entre le plan équatorial de la terre et le plan de rotation de la Terre autour du Soleil, appelée la déclinaison solaire [Quaschnig, 2005], comme illustré sur la figure 2.4.

La déclinaison solaire

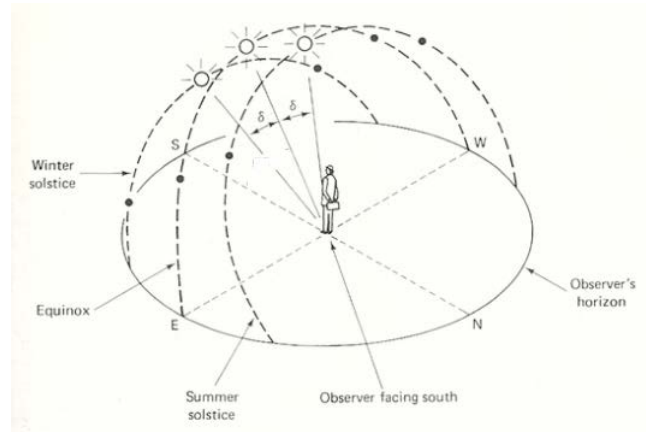


FIGURE 2.5 – L'angle entre le soleil et l'équateur est appelé δ la déclinaison solaire. [Masters, 2013]

La déclinaison δ est égale à zéro aux équinoxes et varie de +23.45 degré le 22 juin à -23.45 degré le 22 décembre, qui varie en fonction du jour julien J [Cooper, 1969] et [MRaoui et al., 2011] :

$$\delta = 23.45 * \sin(360(284 + J)/365) \quad (2.2)$$

Pour calculer le jour Julien de : la journée D du mois M de l'année A .

$$J1 = Ent[(M * 275)/9] \quad (2.3)$$

$$J2 = Ent[(M + 9)/12] \quad (2.4)$$

$$K = 1 + Ent[(A - 4 * Ent[A/4] + 2)/3] \quad (2.5)$$

Ent c'est la partie entière, $K = 2$ pour une année commune et $K = 1$ pour une année bissextile. Le rang de la journée est donné par :

$$J = J1 - J2 * K + D - 30 \quad (2.6)$$

La journée moyenne recommandée et l'angle de déclinaison pour chaque mois [Oates et al., 2003] sont :

Moi	Date	Jour Julian	Déclinaison
Janvier	17	17	-20.9
Février	16	47	-13
Mars	16	75	-2.4
Avril	15	105	9.4
Mai	15	135	18.8
Juin	11	162	23.1
Juillet	17	198	21.2
Aout	16	228	13.5
Septembre	15	258	2.2
Octobre	15	288	-9.6
Novembre	14	318	-18.9
Décembre	10	334	-23.0

L'azimut

Par convention, l'angle d'azimut est positif dans la matinée avec le soleil à l'est et négatif dans l'après-midi avec le soleil à l'ouest. L'angle d'azimut du soleil décrit l'angle entre le nord géographique et le cercle vertical passant par le centre du soleil [Oke, 1988] :

$$\cos \beta = (\sin \delta * \cos \varphi - \cos \delta * \sin \varphi * \cos \eta) / \cos \alpha \quad (2.7)$$

2.2. Caractéristiques du flux solaire

Le flux solaire R_{out} est fonction de la constante solaire Sc (valeur utilisée fournie par le World Radiation Center, $1367W/m^2$), et le jour de l'année (J) [Kreith and Kreider, 1978] :

$$R_{out} = Sc * (1 + 0.034 * \cos(360J/365)) \quad (2.8)$$

Le coefficient de transmissivité τ^M représente la fraction du rayonnement incident à la surface de l'atmosphère qui atteint le sol le long d'une trajectoire verticale. Une valeur de 0.6 était choisie pour τ [Gates, 1980]. Les formules utilisées sont [Kreith and Kreider, 1978] :

$$M = M_0 * P/P_0 \quad (2.9)$$

M représente la longueur du trajet en fonction de l'azimuth solaire. En zone de montagne, il est nécessaire d'utiliser un facteur de correction lié à la pression atmosphérique p/p_0 , qui dépend de l'altitude. M_0 étant calculé grâce à la formule suivante :

$$M_0 = (\sqrt{1229 + (614 * \sin \alpha)^2}) - 614 * \sin \alpha \quad (2.10)$$

Effets liés à la topographie

Pour calculer le rayonnement sur des zones pentues, il est nécessaire de prendre en compte l'angle d'incidence entre le rayon solaire et la surface du sol $\cos(i)$. Il varie en fonction de la position du soleil et de la topographie [Campbell, 1981] :

$$\cos(i) = \cos \alpha * \sin \chi * \cos(\beta - \beta_s) + \sin \alpha * \cos \chi \quad (2.11)$$

χ étant la pente (degrés), et β_s l'exposition (degrés).

Calcul du rayonnement global

Le flux solaire sera une combinaison du rayonnement direct qui passe en ligne droite à travers l'atmosphère vers le récepteur, le rayonnement diffusé par les molécules et aérosols dans l'atmosphère, et le rayonnement réfléchi qui a rebondi sur le sol ou une autre surface, devant le collecteur. Le calcul horaire du rayonnement global est obtenu par la somme des composantes directes R_{DIR} , diffusés R_{diff} et réfléchis R_{ref} :

avec :

$$R_{dir} = Sh * R_{out} \tau^M \cos(i) \quad (2.12)$$

Sh étant une valeur binaire d'ombrage calculée pour chaque heure de la journée et chaque valeur entière d'angle solaire α et d'azimuth solaire β . Quand la cellule est à l'ombre des montagnes voisines la valeur 0 est affectée, sinon c'est la valeur 1.

Nous avons utilisé le modèle isotropique [Liu and Jordan, 1960] pour calculer le rayonnement réfléchi. Ce modèle prend en compte l'angle solaire et la transmissivité de l'atmosphère dans des conditions de ciel clair :

$$R_{diff} = R_{out} * (0.271 - 0.294 * \tau^M) * \sin(\alpha) \quad (2.13)$$

La dernière composante de rayonnement est le rayonnement réfléchi par les surfaces. Cette réflexion peut donner une impulsion considérable des performances, comme par exemple sur une journée ensoleillée avec de la neige ou d'eau devant le collecteur, ou il peut être si modeste qu'il pourrait aussi bien être ignoré. Le rayonnement réfléchi est calculé à partir de la formule de Gate [Gates, 1980] :

$$R_{ref} = r * Sc * (0.271 + 0.706 * \tau^M) * \sin(\alpha) * \sin^2(\chi/2) \quad (2.14)$$

r étant la réflectance du sol (nous avons utilisé une valeur constante de 0.2). La

somme des trois composantes permet d'estimer le rayonnement global R_{tot} pour chaque heure de calcul en W/m^2 :

$$R_{tot} = R_{dir} + R_{diff} + R_{ref} \quad (2.15)$$

Les valeurs journalières de rayonnement global sont obtenues en faisant la somme des valeurs horaires entre le lever et le coucher du soleil. Les conditions nuageuses [Dubayah and Loechel, 1997],[Badescu, 1998] et [Hofierka and Suri, 2002] sont calculées en utilisant le 'cloud attenuation factor' K_c défini dans [Kasten and Czeplak, 1980] ne nécessitent que des valeurs mesurées en octas comme on les trouve généralement dans les postes météo ; un octa représentant 1/8 du ciel visible. Le rayonnement solaire avec ciel nuageux R_{totc} est ensuite calculé par la formule suivante :

$$R_{totc} = R_{tot} * K_c \quad (2.16)$$

avec

$$K_c = (1 - 0.75(N/8)^{3.4}) \quad (2.17)$$

N étant la nébulosité en octas. Le rayonnement global peut être calculé pour des durées allant d'un jour à un an, par sommation des valeurs journalières pendant la période considérée. Afin d'économiser du temps de calcul, il est possible de calculer une valeur mensuelle en extrapolant un nombre limité de jours de calcul.

Nous allons traiter un exemple dans le nord de la France. Les données météorologiques mesurées de la STATION MÉTÉO France de Troyes-Barbère (latitude : $48^{\circ}19'24''$ N, longitude $4^{\circ}01'12''$ E, 112m d'altitude) ont été utilisées dans ce travail.

Les mesures de terrain ont été faites entre le 1 Janvier 2009 (00 : 00) et le 31 Décembre 2011 (23h00). La nébulosité a été mesurée chaque heure (nombre de minutes d'ensoleillement par heure) par Météo-France.

Sur la figure 2.6, on peut voir l'influence de la nébulosité du rayonnement solaire en trois mois différents ; nous choisissons à titre d'exemple Janvier, Juillet et Septembre ; ce rayonnement a été calculé à midi (12h). Nous constatons qu'une augmentation de la nébulosité implique une diminution du rayonnement.

La nébulosité mesurée a été utilisée pour construire le facteur d'atténuation nuage, qui a ensuite été intégrée pour obtenir la quantité moyenne totale d'énergie mensuelle reçue. La figure 2.7 présente le rayonnement solaire annuel calculé à partir des mesures de nébulosité, pour ciel clair, tous les mois pendant les années 2009, 2010, 2011 et leur moyenne.

La figure 2.8 et le tableau 2.2. présentent l'ensoleillement moyen journalier dans la zone autour de la station météorologique, chaque mois en prenant en compte le facteur de nuage (nébulosité).

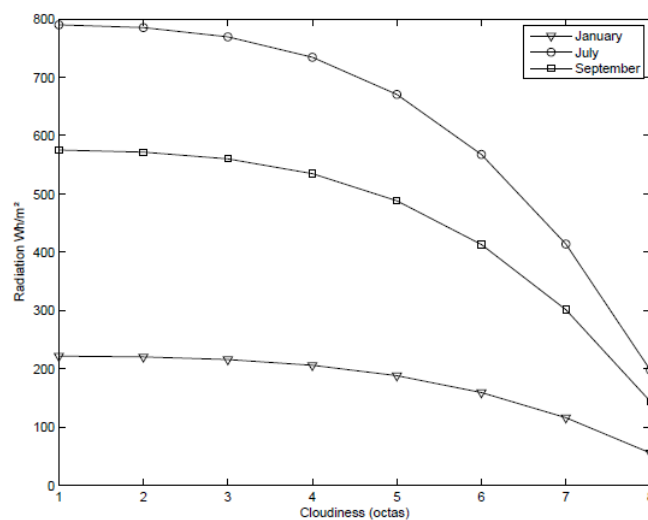


FIGURE 2.6 – L'influence de nébulosité sur l'ensoleillement sur 3 différents mois

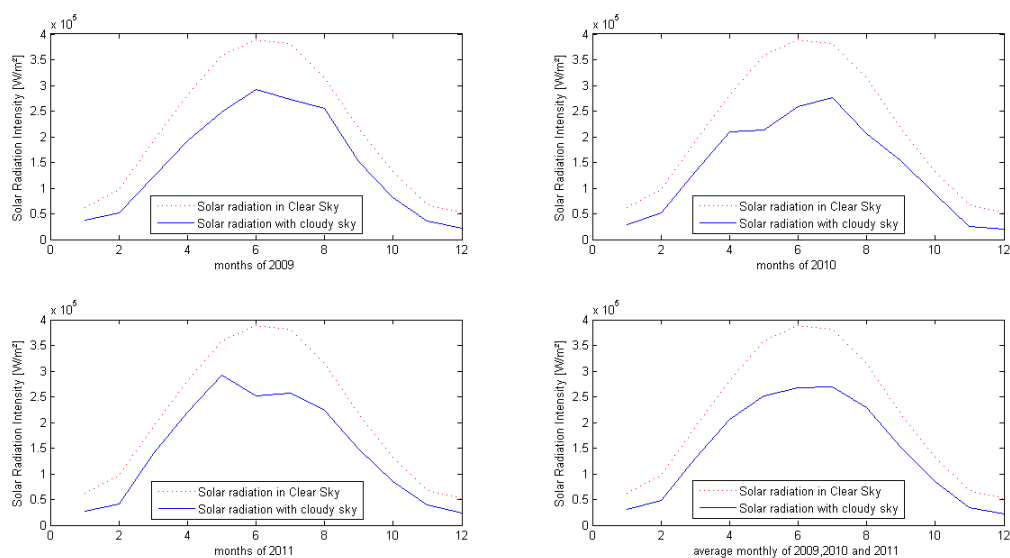


FIGURE 2.7 – L'ensoleillement dans les deux cas : ciel clair et nuageux entre 2009 et 2011

2.3. Estimation de l'ensoleillement en utilisant trois méthodes simples

Plusieurs modèles pour estimer le rayonnement solaire globale ont été trouvés dans la littérature [Nguyen and Pryor, 1997], [Jin et al., 2005], [Ertekin and Evrendilek, 2007], [Angstrom, 1924]. Les modèles utilisés dans cette thèse pour estimer le rayonnement solaire global journalier de la durée mesurée d'heures d'ensoleillement sont les suivantes [Menges et al., 2006].

- Le premier modèle linéaire utilisé est du type Angström-Prescott [Angstrom, 1924] :

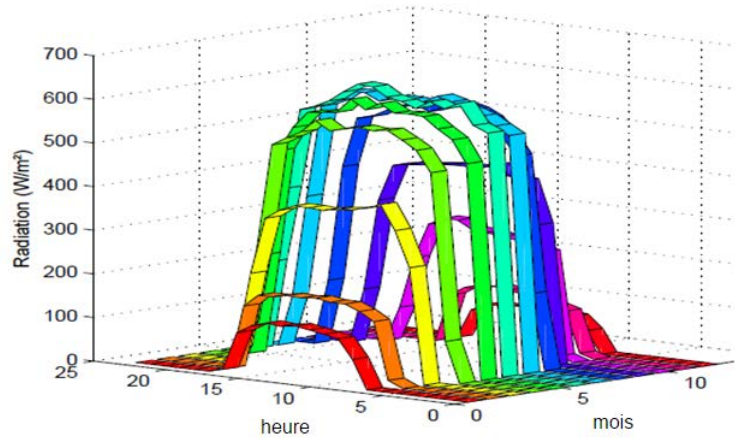


FIGURE 2.8 – L’enseillement moyen journalier pour chaque mois

Jan	fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	D
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	92.61	492.45	555.61	542.43	172.26	0	0	0	0
0	14.62	265.45	475.40	543.80	569.36	560.51	484.12	318.83	11.27	10.01	0
66.12	145.38	346.68	522.93	564.54	615.85	579.25	528.26	415.41	244.98	102.56	50
109.69	164.85	402.18	542.86	588.96	599.22	589.99	562.67	423.38	253.53	112.44	79
116.14	177.78	390.12	560.62	590.97	611.64	604.17	579.13	443.99	266.06	123.17	83
121.84	177.86	382.64	556.00	589.11	592.31	612.76	586.74	433.92	268.91	130.37	83
127.34	183.27	379.09	559.66	607.34	604.45	595.22	576.12	433.96	274.96	134.88	88
122.40	179.96	373.18	552.85	589.21	610.31	597.72	562.28	433.12	277.48	139.94	87
125.66	181.31	375.21	544.02	609.23	629.95	598.75	575.22	429.01	295.02	130.70	83
115.74	174.93	375.48	563.80	575.35	632.40	586.13	568.32	425.14	295.15	129.22	82
96.24	174.31	361.90	533.74	571.56	610.96	601.41	553.28	422.05	277.63	107.91	66
8.03	145.87	339.34	515.91	567.03	586.12	600.89	535.37	415.69	197.26	0	0
0	0	209.46	496.43	529.19	569.74	574.45	527.62	332.36	79.66	0	0
0	0	33.03	265.17	471.70	558.34	558.97	413.05	124.24	0	0	0
0	0	0	82.89	229.26	373.65	348.08	148.09	0	0	0	0
0	0	0	0	0	202.05	116.04	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLE 2.1 – L’enseillement moyen mensuel chaque heure (en W/m^2) entre 00h et 23h

$$H_g/H_0 = a_1 + b_1(S/S_0) \tag{2.18}$$

— le deuxième est du type quadratique :

$$H_g/H_0 = a_2 + b_2(S/S_0) + c_2(S/S_0)^2 \quad (2.19)$$

— le troisième est du type cubique :

$$H_g/H_0 = a_3 + b_3(S/S_0) + c_3(S/S_0)^2 + d_3(S/S_0)^3 \quad (2.20)$$

où a_i , b_i , c_i et d_i sont des constantes déterminées par la méthode des moindres carrées. H_g est le rayonnement global moyen mensuel mesuré sur un plan horizontal. H_0 est le rayonnement global moyen mensuel sur un plan horizontal. S représente la durée de l'ensoleillement effective et S_0 est la durée maximale d'ensoleillement ou durée du jour.

Type de modèle	a	b	c	d
Linéaire	0.491	0.2634	-	-
Quadratique	0.4338	0.2327	0.659	-
Cubique	0.4002	0.2147	0.1530	0.1196

TABLE 2.2 – Coefficients d'Angström

Pour évaluer les résultats obtenus par les différents modèles, nous avons calculé les écarts relatifs moyens algébriques (MBE), erreur en pourcentage (MPE), et quadratique (RMSE), dont les expressions sont données comme suit [Cooper, 1969], [Muzathik et al., 2011]

écarts relatifs moyens algébriques (MBE : Then mean bias error) :

$$MBE = (1/n) \sum_1^n (H_{i,g} - H_{i,0}) \quad (2.21)$$

Erreur en pourcentage (MPE :The mean Pourcentage error) :

$$MPE = (1/n) \sum_1^n ((H_{i,g} - H_{i,0})/H_{i,0}) * 100 \quad (2.22)$$

Erreur quadratique(RMSE :The root mean square error)

$$RMSE = ((1/n) \sum_1^n (H_{i,g} - H_{i,0})^2)^{1/2} \quad (2.23)$$

Le tableau 2.3. résume les indicateurs statistiques de précision MBE, MPE, et RMSE.

Il est à noter que les valeurs estimées par les différents modèles sont en bonnes concordances avec les valeurs mesurées ; cependant les meilleurs résultats sont obtenus par le modèle cubique avec un MPE de -0.012818 %.

L'ensoleillement mesuré (référence) et les valeurs calculées du rayonnement global quotidien moyen des trois modèles, sont illustrés dans la figure 2.9 .

-	Modèle linéaire	Modèle carré	Modèle cubique
MBE	1.6003	-2.0655	-2.4907
MPE	0.117021	0.03981	-0.012818
RMSE	4.8607	4.4275	4.5492

TABLE 2.3 – les indicateurs statistiques de précision

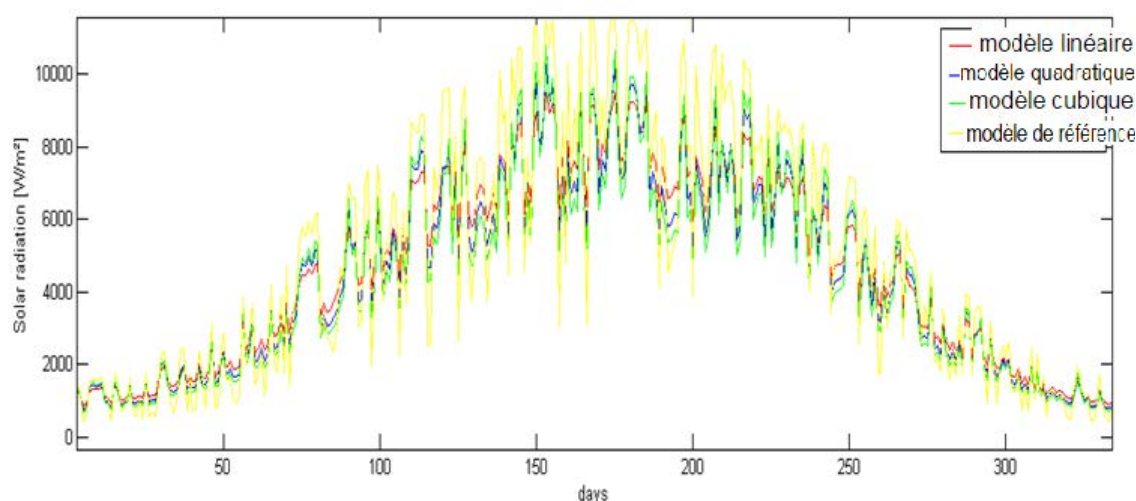


FIGURE 2.9 – Comparaison entre l'ensoleillement calculée et les trois modèles

2.4. Conclusion

L'ensoleillement solaire moyen mensuel sur une surface horizontale et sur le site de Troyes Barberey a été estimée en utilisant plusieurs modèles. Il s'agit de la régression linéaire du type Angstrom–Prescott, de la forme linéaire, quadratique et cubique. Tous les modèles sont basés sur la fraction d'ensoleillement mesurée. Une analyse statistique a été faite en utilisant les écarts relatifs moyens algébrique, erreur en pourcentage et quadratique. Une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles calculées par les différents modèles qui peuvent être utilisés pour des sites dont le climat est similaire à celui de Troyes Barberey.

3. Modélisation de la production d'énergie

La performance des modules photovoltaïques dépend de plusieurs paramètres, à savoir l'éclairement, la température et l'état de la charge à alimenter. L'utilisation du pilotage MPPT [Minh et al., 2013] permet de maximiser de la puissance extraite. Dans le cas du système hybrid, nous allons utiliser un modèle simple du générateur photovoltaïque qui permet de calculer la puissance produite P_{pv} en tout instant si l'ensoleillement $G(W/m^2)$ est connu [Borowy and Salameh, 1996].

$$P_{pv} = P_R * f_{pv}(G/G_0)[1 + \alpha_p(T - T_0)] \quad (2.24)$$

Avec, f_{pv} est le facteur qui représente le panneau photovoltaïque, P_R est la puis-

sance nominale du module photovoltaïque, G_0 est le rayonnement incident aux conditions standards, G est l'ensoleillement global sur le système photovoltaïque, α_p est le coefficient de puissance de la température, T est la température du panneau photovoltaïque, et T_0 est la température du module photovoltaïque dans des conditions de test standard.

III. Énergie éolienne

1. Introduction

Le potentiel éolien dans une région donnée se calcule à partir des distributions de la vitesse moyenne. Lorsqu'on dispose de mesures de vent, l'information peut être représentée sous forme d'histogramme, permettant de donner la variation de la fréquence relative des vitesses de vent. La modélisation de la distribution de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs modèles [Philippopoulos et al., 2012], présents dans la littérature qui sont utilisées pour ajuster les distributions de la vitesse du vent sur une période de temps. Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull [Weibull, 1951]. Les avantages de l'utilisation de la fonction de Weibull à deux paramètres ont été mis en évidence par Justus et al. [Justus et al., 1976], [Justus et al., 1978].

1.1. La distribution de Weibull

Sa fonction exponentielle à deux paramètres permet de caractériser la distribution fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée. Elle comprend un paramètre d'échelle $A(m/s)$ qui renseigne sur la moyenne du vent caractéristique du site et un paramètre de forme k (sans unité) indiquant quant à lui le caractère plus ou moins pointu de la distribution. Sa densité de probabilité se présente sous la forme :

$$f(v) = (k/A) * (v/A)^{k-1} * \exp(-(v/A)^k) \quad (2.25)$$

Où $f(v)$, est la probabilité pour que le vent souffle à la vitesse v , k le facteur de forme, sans dimension, qui caractérise la dissymétrie de la distribution, A est le facteur d'échelle.

1.2. Influence des paramètres Weibull sur la distribution statistique des vitesses de vent

Le facteur de forme k et le facteur d'échelle A de la loi de Weibull ont des influences différentes sur la distribution statistique des vitesses de vent. Le facteur d'échelle A est relié directement à la vitesse moyenne du vent. Pour une même valeur de k , l'augmentation de la valeur de A représente une augmentation de la valeur moyenne. C'est-à-dire une augmentation du nombre de vitesses de vent élevées et une diminution du nombre de vitesses faibles. La courbe de distribution des vitesses de vent est alors plus

aplatie et avec un maximum qui se décale vers la droite. Par contre, si l'on augmente la valeur du paramètre k en fixant celle de A , la courbe de distribution des vitesses de vent devient plus étroite. Son maximum augmente et est décalé vers la droite. On a un plus grand nombre de vitesses de vent autour de la moyenne alors que le nombre de vitesses de vent faibles et le nombre de vitesses de vent élevées diminuent.

1.3. Détermination des paramètres de Weibull

Il existe plusieurs méthodes [Justus et al., 1978], [Seguro and Lambert, 2000], [Rocha et al., 2012] pour analyser un régime des vents par la distribution de Weibull afin d'estimer les paramètres A et k . Citons parmi elles :

- La méthode des moindres carrés.
- La méthode des moments.
- La méthode de l'écart type.
- La méthode du maximum de vraisemblance.
- La méthode du maximum de vraisemblance modifiée

Les méthodes les plus utilisés que nous allons présenter sont la méthode des moindres carrés [Rocha et al., 2012], dite méthode graphique et la méthode du maximum de vraisemblance.

1.4. La méthode graphique (Moindre carrés)

C'est une méthode graphique basée sur la fonction cumulative de Weibull, en la transformant en une forme linéaire en adoptant des échelles logarithmiques [Garcia et al., 1998], [Hewson and Wade, 1977]. L'expression de la distribution cumulée de la vitesse du vent donnée dans l'équation (2.26) peut-être réécrite sous la forme suivante :

$$1 - \int f(v)dv = e^{-(v/A)^k} \quad (2.26)$$

1.5. Méthode du maximum de vraisemblance

C'est une méthode itérative de détermination des paramètres de Weibull, où k et A sont donnés par les relations suivante [Stevens and Smulders, 1979], [Chang et al., 2003] :

$$k = \left(\sum_{i=1}^n (v_i^k \ln(v_i)) / \sum_{i=1}^n (v_i^k) \right) - \left(\sum_{i=1}^n (\ln(v_i)) / n \right) \quad (2.27)$$

$$A = \left((1/n) \sum_{i=1}^n (v_i^k) \right)^{1/k} \quad (2.28)$$

Où v_i est la vitesse non nulle du vent à un instant i et n est le nombre de données de vitesses de vent non nulles. Cette méthode utilise une équation algébrique non-

linéaire qui ne possède pas de solution analytique. L'estimation des paramètres de Weibull via la méthode du maximum de vraisemblance est difficile parce qu'elle doit être résolue numériquement par un processus itératif. Une fois le paramètre de forme devient optimal, il est remplacé dans l'autre équation pour trouver le facteur d'échelle.

2. Extrapolation verticale de la vitesse du vent

Pour déterminer la puissance moyenne extractible de la turbine éolienne il est nécessaire de connaître la vitesse du vent à son moyeu. Comme les mesures de la vitesse du vent sont effectuées généralement à une hauteur normalisée de 10 mètres du sol, Donc pour obtenir des données de vitesses du vent à une hauteur désirée, on doit procéder à une extrapolation verticale [Monin and Obukhov, 1954].

$$v(t) = v_r(t) * (h/h_r)^\gamma \quad (2.29)$$

Où $v(t)$, $v_r(t)$ et γ représentent respectivement la vitesse du vent à la hauteur h , la vitesse mesurée du vent à la hauteur de référence h_r et l'exposant caractérisant le cisaillement du vent.

3. Puissance produite par le générateur éolien

Chaque générateur éolien est caractérisé par une courbe de puissance qui dépend de la vitesse de fonctionnement. Un modèle simple peut simuler la puissance de sortie comme suit [Pallabazzer, 1995]

$$P_{wg}(v) = P_r * \begin{cases} 0 & \text{si } V < V_c, V > V_f \\ (V^2 - V_c^2)/(V_r^2 - V_c^2) & \text{si } V_c \leq V \leq V_r \\ 1 & \text{si } V_r \leq V \leq V_f \end{cases} \quad (2.30)$$

Avec P_r la puissance nominale de générateur éolien, V_c la vitesse de démarrage pour laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie. V_r la vitesse nominale de l'éolienne et V_f représente la vitesse maximale pour laquelle la production est arrêtée par raison de sécurité et l'éolienne mise en drapeau.

4. Estimation de la production énergétique

À l'intérieur de la couche limite atmosphérique, le régime éolien est directement influencé par la rugosité de la surface, la présence d'obstacles, la topographie etc.... Ces paramètres doivent donc être pris en considération pour l'évaluation des ressources éoliennes disponibles dans un site donné et pour mieux localiser l'emplacement des fermes éoliennes. A cet effet, le logiciel WAsP (Wind Analysis and Application Program) est utilisé. Ce logiciel, qui a été développé par une équipe de recherche du laboratoire RISO (Danemark), est un outil très employé pour la caractérisation éolienne des sites. Parmi les études basées sur le WasP, on peut citer l'Atlas Eolien Européen.

Le logiciel WAsP est un PC-programme avec lequel on effectue le traitement statistique des données vent et les extrapolations horizontale et verticale de ces données. Le programme contient un ensemble de modèles pour calculer les effets des obstacles, de la rugosité du sol et de la topographie sur l'écoulement du vent. L'analyse consiste en un traitement des données vent (vitesse et direction) pour l'élaboration d'un potentiel éolien de référence dans toutes les directions. Ce dernier est ensuite transposé à l'ensemble de la zone d'étude en prenant en compte la topographie, les obstacles et les variations de la rugosité.

D'une manière générale, WAsP donne des résultats acceptables. Mais comme tous les modèles numériques, la précision de ces résultats dépend à la fois de la résolution des calculs, de la validité des données et des erreurs dans l'approximation des distributions. A l'origine, ce logiciel avait été conçu pour des applications sur des terrains plats, mais les dernières versions ont été améliorées. Pour estimer le potentiel énergétique avec le WAsP, un certain nombre de données sont nécessaires tels que les données météorologiques (vitesses et directions du vent)

A partir de ces données, le logiciel nous donne les résultats suivants : les caractéristiques statistiques de la vitesse du vent qui sont la vitesse moyenne du vent, les paramètres k et A de Weibull, la densité de puissance ainsi que la fréquence du vent et ce, pour différentes directions. Le paramètre k donne une indication sur la nature du vent. Le facteur d'échelle permet d'estimer le potentiel éolien disponible. La densité de puissance représente la puissance éolienne disponible dans une région par unité de surface. La fréquence du vent représente la fraction de temps pendant laquelle la vitesse est égale à une certaine valeur V . Tous ces paramètres sont donnés dans un tableau et représentés par la rose des vents et la courbe de fréquence. La rose des vents correspond à un cercle divisé en un certain nombre de secteurs. Chaque secteur représente une direction. Le rayon de chacun des secteurs indique la fréquence du vent pour chaque direction. La direction dominante du vent est représentée par le rayon le plus long de la rose des vents. La rose des vents représentée sur la figure 2.10 comprend 12 secteurs de 30 degrés et montre que les directions Sud-Sud-Est et Ouest-Nord-Ouest sont les directions dominantes de la vitesse du vent.

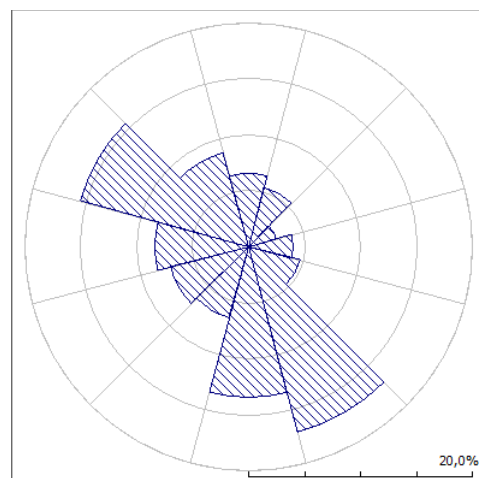


FIGURE 2.10 – Histogramme et rose des vents

Dans ce qui suit, nous allons estimer la vitesse du vent et la production énergétique : mensuelle, annuelle et horaire.

4.1. Estimation de la production énergétique mensuelle

Les paramètres mensuels de weibull A et k , la rose des vents ainsi que la vitesse moyenne de 12 mois de l'année sont présentés pas les figures 2.11,- 2.22 suivantes :

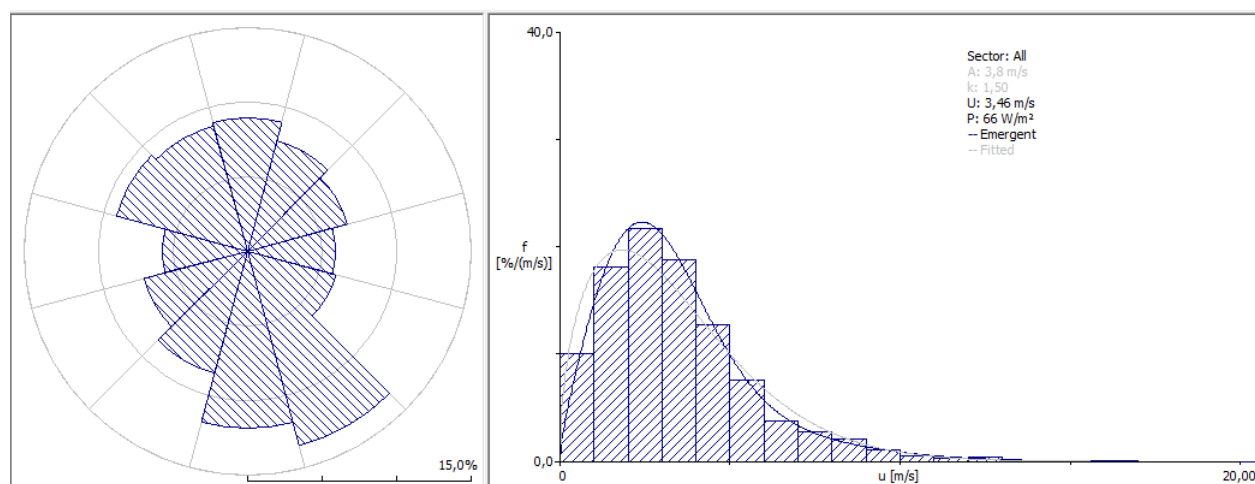


FIGURE 2.11 – Histogramme et rose des vents en janvier à 10m

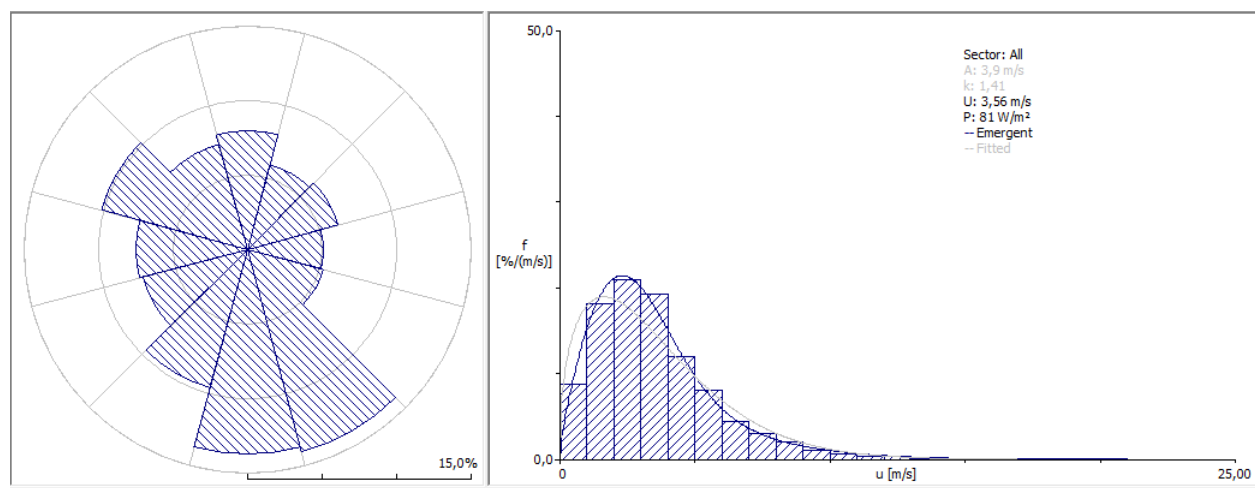


FIGURE 2.12 – Histogramme et rose des vents en fevrier à 10m

Pour résumer, la figure 2.23 présente la vitesse moyenne mensuelle du vent, ainsi que les paramètres de weibull, la vitesse atteint la plus grande valeur de 3.73 m/s en Mars avec $A = 4.1$ et $k = 1.52$ et une puissance de 82 W/m^2 montré dans la figure 2.24. Par contre, en octobre la vitesse descend à 3.31 m/s avec $A = 3.70$ et $k = 1.60$ pour une puissance de 55 W/m^2

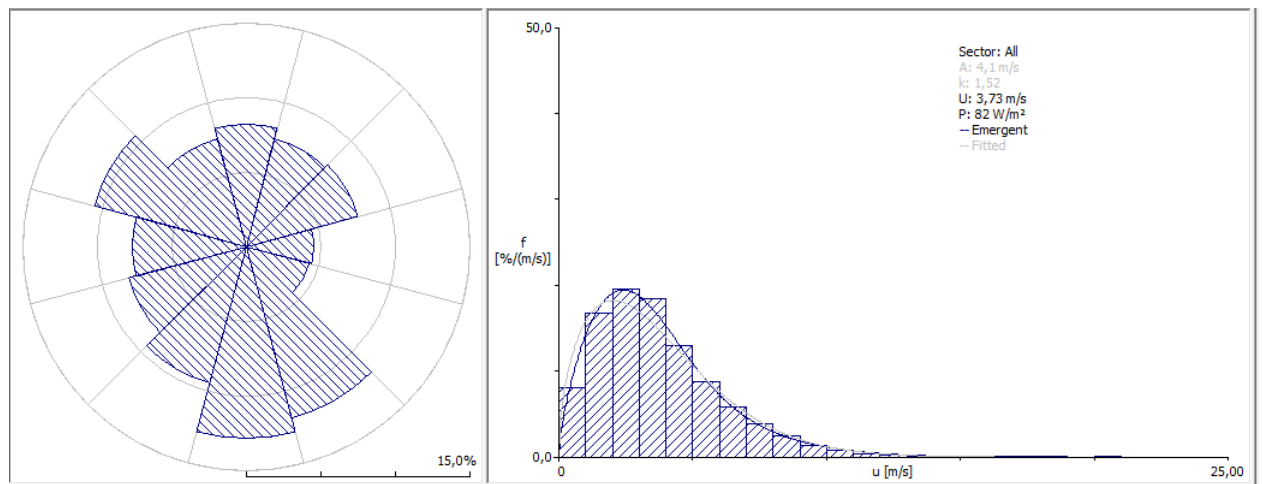


FIGURE 2.13 – Histogramme et rose des vents en mars à 10m

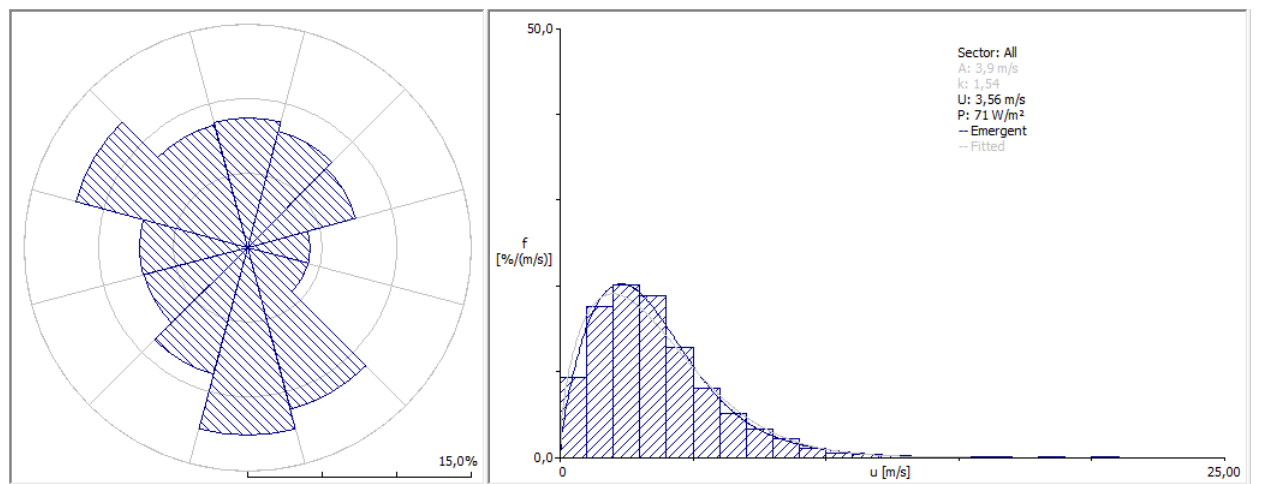


FIGURE 2.14 – Histogramme et rose des vents en avril à 10m

4.2. Estimation de la production énergétique annuelle

La figure 2.26 donne la rose des vents annuelle ainsi que l'historgramme de la variation annuelle de la vitesse du vent, ajusté par la distribution de Weibull.

Dans la Figure 2.26, nous remarquons que les directions prédominante sur le site de Troyes barbery sont le sud et le ouest nord ouest avec une vitesse moyenne annuelle égale à 3.47m/s et la densité de puissance moyenne annuelle est égale à 65W/m². Quant aux deux paramètres de Weibull, le facteur de forme est égal à 1.56 et le facteur d'échelle égal à 3.8m/s. Le taux de fréquence des vitesses nulles représente une mesure de 11%. Par ailleurs, le vent couvre une gamme de vitesse qui atteint le 18m/s.

Pour une meilleure analyse et en fonction des 12 directions de la rose des vents, le Tableau 4.2. regroupe une étude statistique englobant les deux paramètres de Weibull, la vitesse moyenne, la densité de puissance moyenne et la fréquence relative pour chaque direction.

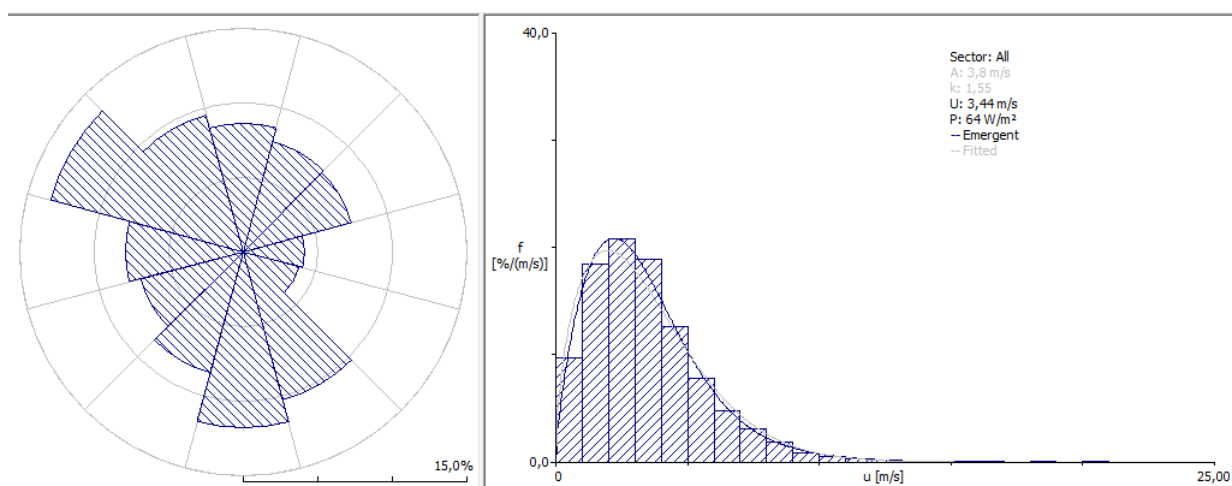


FIGURE 2.15 – Histogramme et rose des vents en mai à 10m

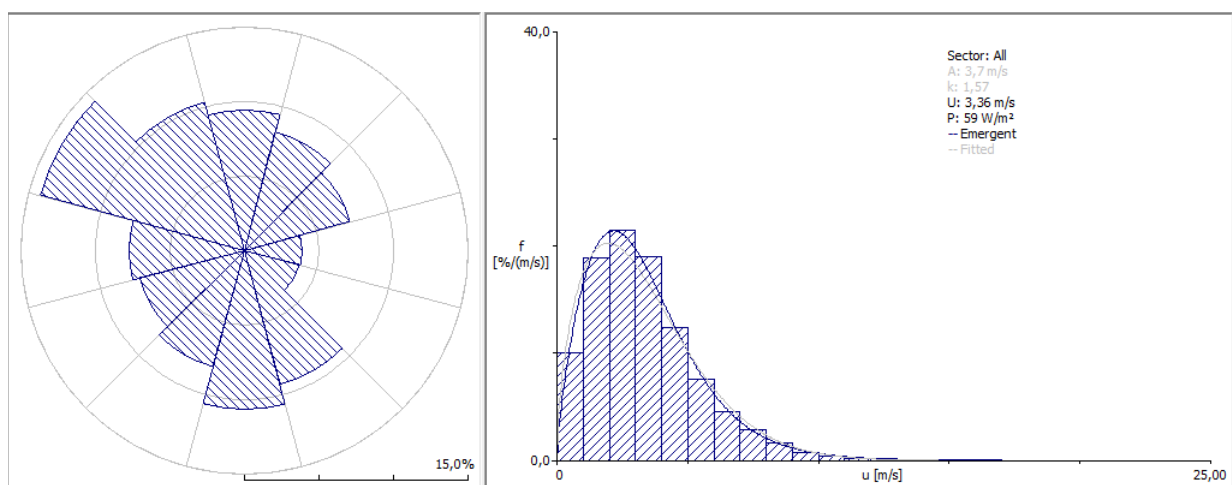


FIGURE 2.16 – Histogramme et rose des vents en juin à 10m

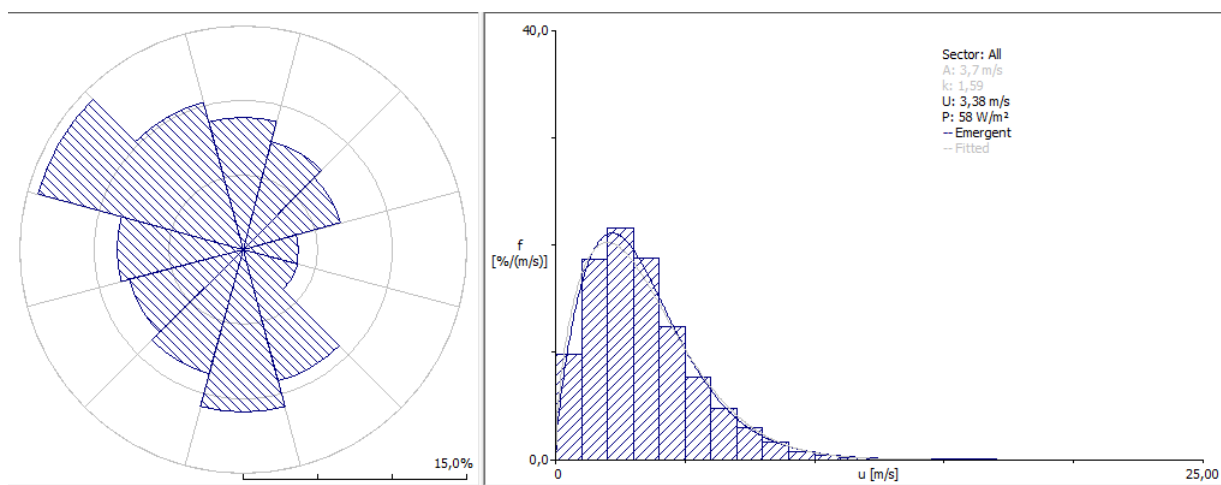


FIGURE 2.17 – Histogramme et rose des vents en juillet à 10m

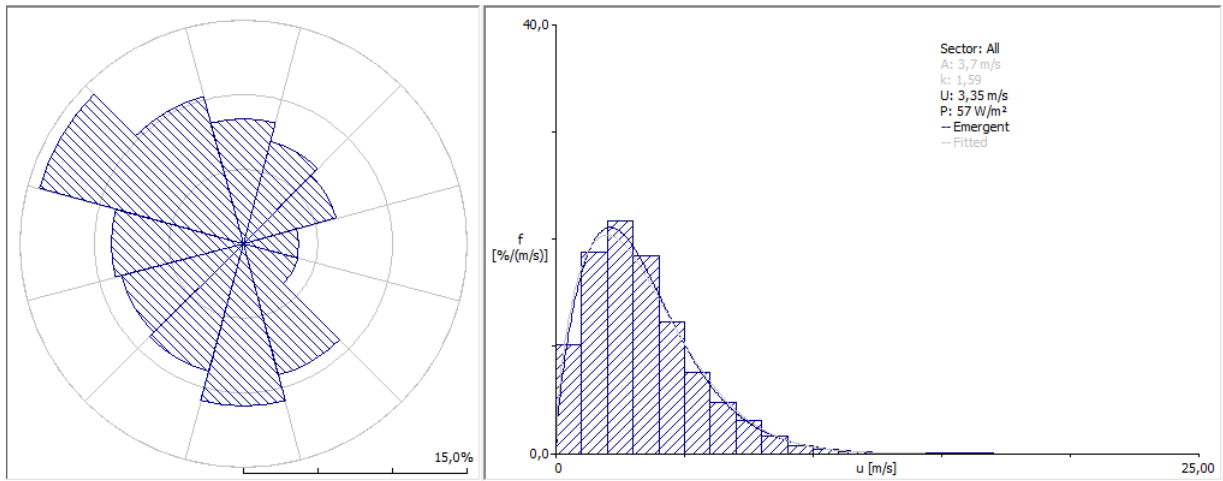


FIGURE 2.18 – Histogramme et rose des vents en août à 10m

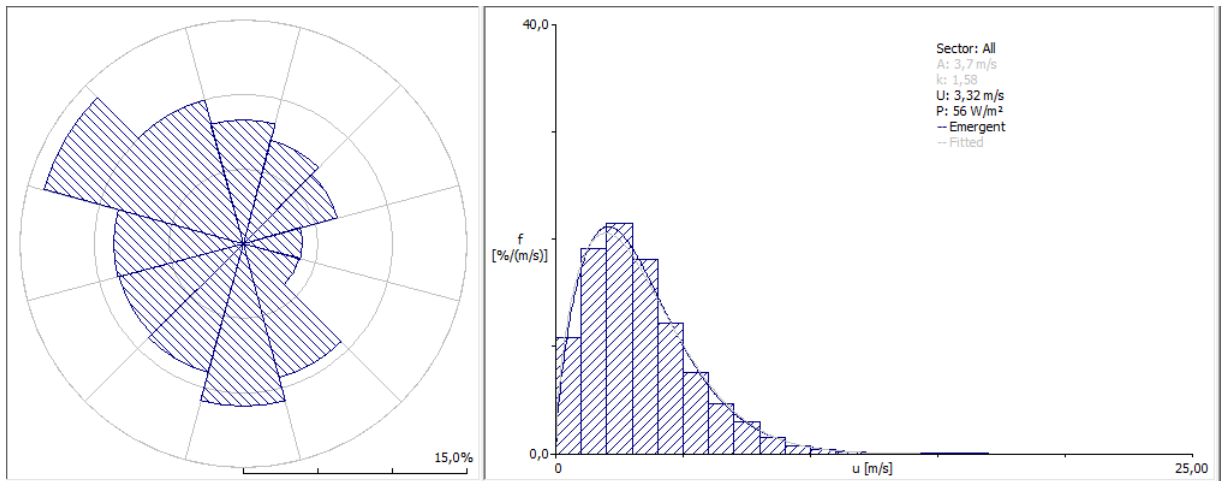


FIGURE 2.19 – Histogramme et rose des vents en septembre à 10m

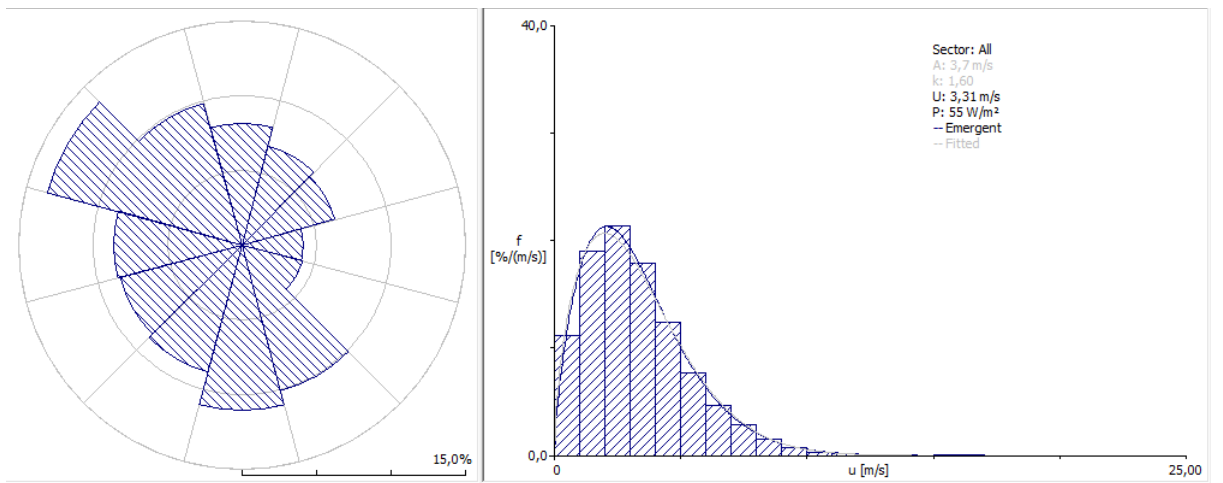


FIGURE 2.20 – Histogramme et rose des vents en octobre à 10m

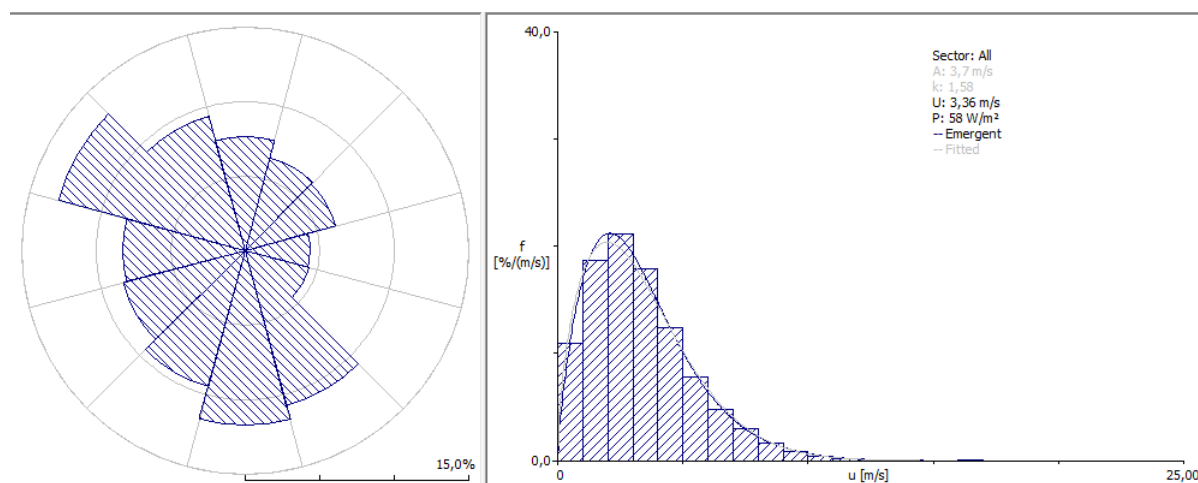


FIGURE 2.21 – Histogramme et rose des vents en novembre à 10m

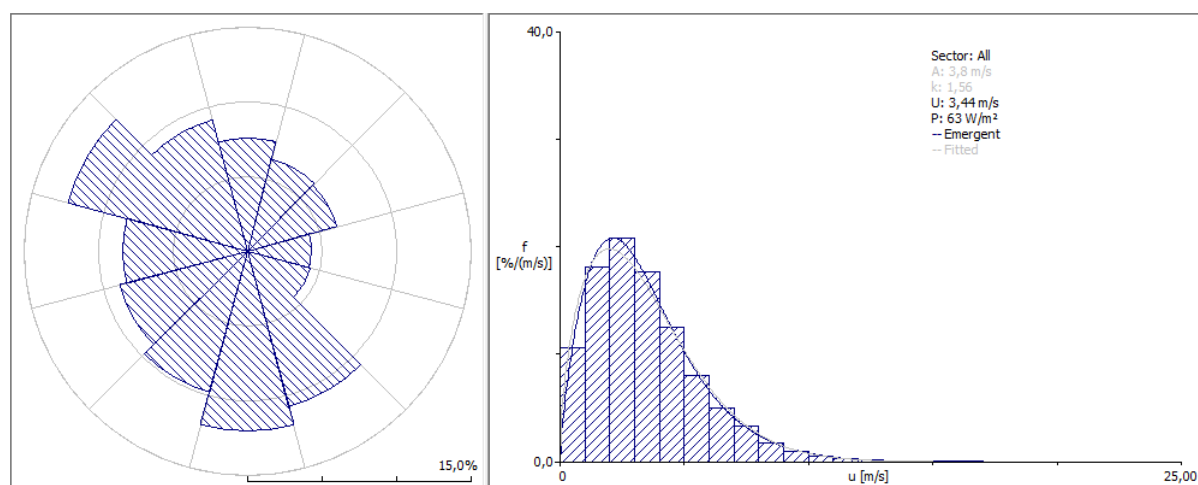


FIGURE 2.22 – Histogramme et rose des vents en décembre à 10m

4.3. Estimation de la production énergétique horaire

Après une estimation mensuelle et annuelle, une estimation pour calculer la moyenne pour chaque heure de la journée, le Tableau 4.3. représente les moyennes horaires de la vitesse du vent, de deux paramètres de weibull ainsi que la puissance.

On remarque que la vitesse du vent est un peu élevée pendant la journée et elle atteint une moyenne de 4.47 m/s à $14h$, avec les paramètres de weibull ($A = 5 \text{ m/s}$ et $k = 1.87$) et une puissance de 107 w/m^2 . Cette puissance dépasse le 60 w/m^2 entre $8h$ et $18h$, et elle est entre 41 w/m^2 et 60 w/m^2 sur les autres heures du jour.

5. Conclusion

La vitesse globale moyenne horaire, mensuelle et annuelle pour les éoliennes à axe verticale pour le site de Troyes Barberey, a été estimée à l'aide de logiciel Wasp pour

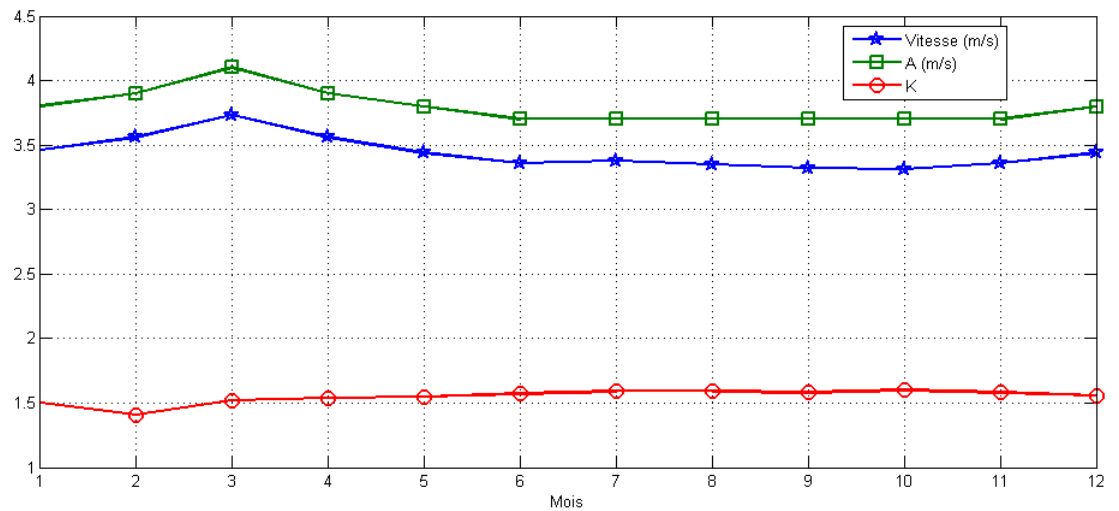


FIGURE 2.23 – Moyenne horaire de la vitesse et des paramètres de weibull à 10m dans la région de Troyes Barberey

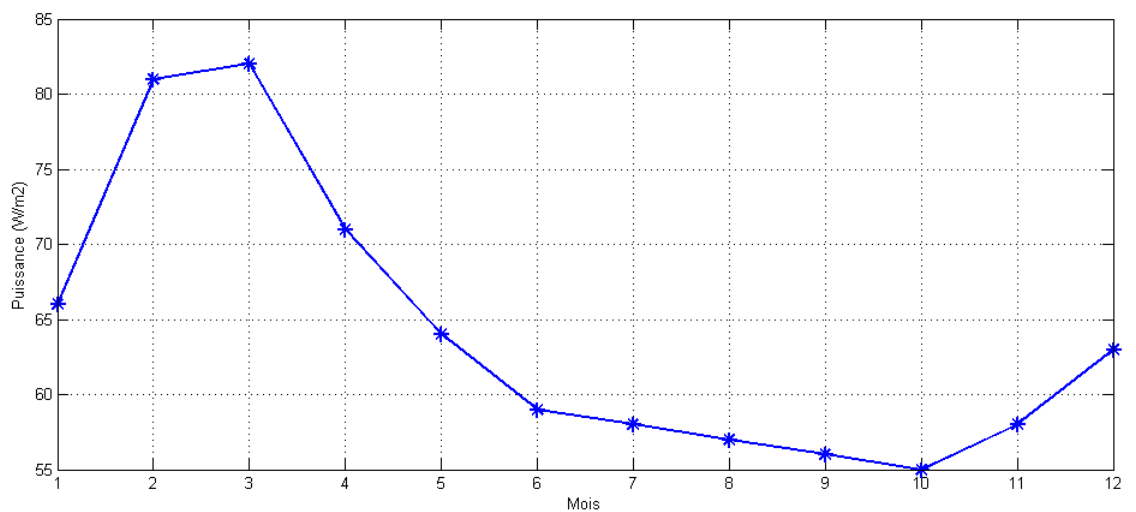


FIGURE 2.24 – Puissance pour une éolienne à axe verticale à 10m dans la région de Troyes Barberey

faire l'analyse sectorielle du gisement éolien.

IV. Modélisation d'énergie du stockage

Le modèle mathématique de l'état de chargement de la batterie dépend de l'état précédent ainsi que l'énergie produite par l'éolienne E_{wg} , l'énergie produite par le générateur photovoltaïque E_{pv} et l'énergie demandée par la charge E_d . L'état de chargement des batteries SOC_b peut être calculé selon deux scénarios [Kaabeche et al., 2006].

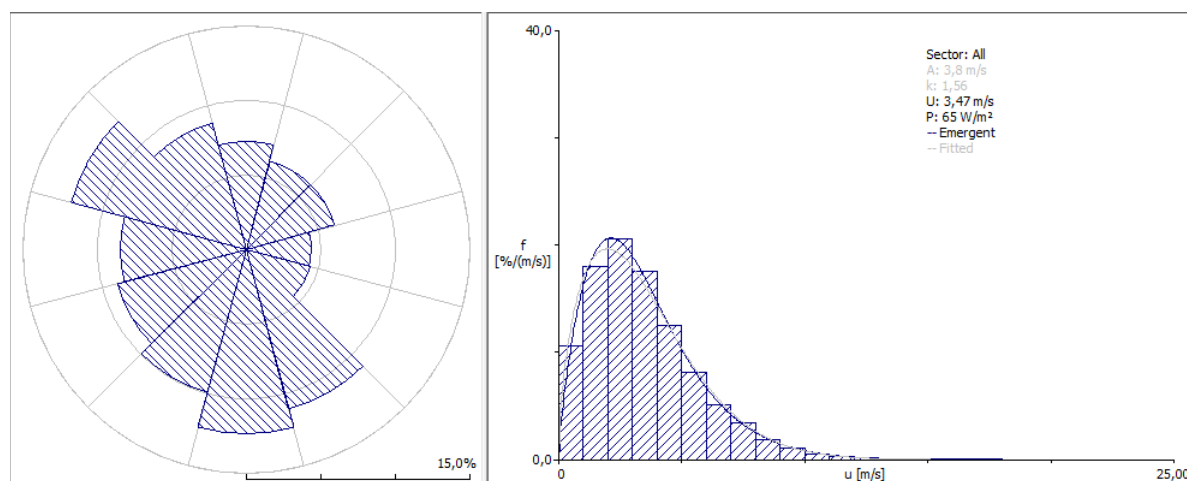


FIGURE 2.25 – Histogramme et rose des vents annuel à 10m dans la région de Troyes Barberey

Direction	fréquence	A (m/s)	k	vitesse (m/s)	$P(w/m^2)$
N	7.3	3.7	1.97	3.27	44
NNE	6.1	3.5	2.05	3.14	35
ENE	6.1	3.2	1.66	2.90	35
E	4.3	2.2	1.69	1.99	11
ESE	4.4	2.3	1.70	2.06	12
SSE	11.1	3.1	1.80	2.76	28
S	12.4	3.8	1.56	3.44	64
SSO	9.9	5.6	1.85	4.94	154
OSO	8.9	6.0	2.25	5.33	159
O	8.5	4.8	1.88	4.30	99
ONO	12.2	3.6	1.83	3.18	42
NNO	8.8	3.0	1.64	2.65	27

TABLE 2.4 – Étude statistique annuelle du vent pour chaque direction

1. Premier scénario

Dans le cas où $E_{pr} \geq E_d$, les batteries sont dans le processus de chargement. Et la capacité de stockage instantané SOC_b est donnée par :

$$SOC_b(t) = SOC_b(t-1) + \eta_{bat} * (E_{pr}(t) * \eta_{inv} - E_d(t)/\eta_{inv}) \quad (2.31)$$

Avec :

$$\begin{cases} E_{pv}(t) = P_{pv}(t) * \Delta(t) \\ E_{wt}(t) = P_{wt}(t) * \Delta(t) \\ E_d(t) = P_d(t) * \Delta(t) \end{cases} \quad (2.32)$$

$P_{pv}(t)$, $P_{wt}(t)$ et $E_d(t)$ sont respectivement : la puissance produite par le générateur

heure	vitesse (m/s)	A (m/s)	k	$P(w/m^2)$
1	3.03	3.3	1.5	44
2	2.97	3.3	1.48	44
3	2.85	3.2	1.41	45
4	2.89	3.2	1.41	46
5	2.91	3.2	1.41	46
6	2.93	3.2	1.32	50
7	3.00	3.3	1.35	53
8	3.20	3.5	1.38	60
9	3.46	3.8	1.45	73
10	3.73	4.2	1.58	81
11	4.07	4.6	1.73	92
12	4.32	4.8	1.74	104
13	4.38	4.9	1.91	102
14	4.47	5.0	1.87	107
15	4.44	5.0	2.02	99
16	4.3	4.8	1.92	94
17	3.97	4.5	1.89	77
18	3.66	4.1	1.8	62
19	3.31	3.7	1.66	50
20	2.99	3.3	1.56	42
21	2.99	3.3	1.58	41
22	3.00	3.3	1.49	44
23	3.02	3.3	1.52	45
24	3.04	3.3	1.45	46

TABLE 2.5 – La vitesse, les paramètres de weibull et la puissance (par W/m^2) entre 00h et 23h en moyenne

photovoltaïque à l'instant t , la puissance produite par l'éolienne à l'instant t , et la puissance demandée par la charge à l'instant t ; $\Delta(t)$ est le pas de simulation ($\Delta(t) = 1h$).

η_{inv} et η_{bat} représentent respectivement le rendement de l'onduleur et le rendement de chargement des batteries.

2. Deuxième scénario

Il s'agit du cas où $E_{pr} \leq E_d$, qui correspond au processus de déchargement des batteries. La capacité de stockage instantané SOC_b est donnée par :

$$SOC_b(t) = SOC_b(t-1) + (E_{pr}(t) * \eta_{inv} - E_d(t)) \quad (2.33)$$

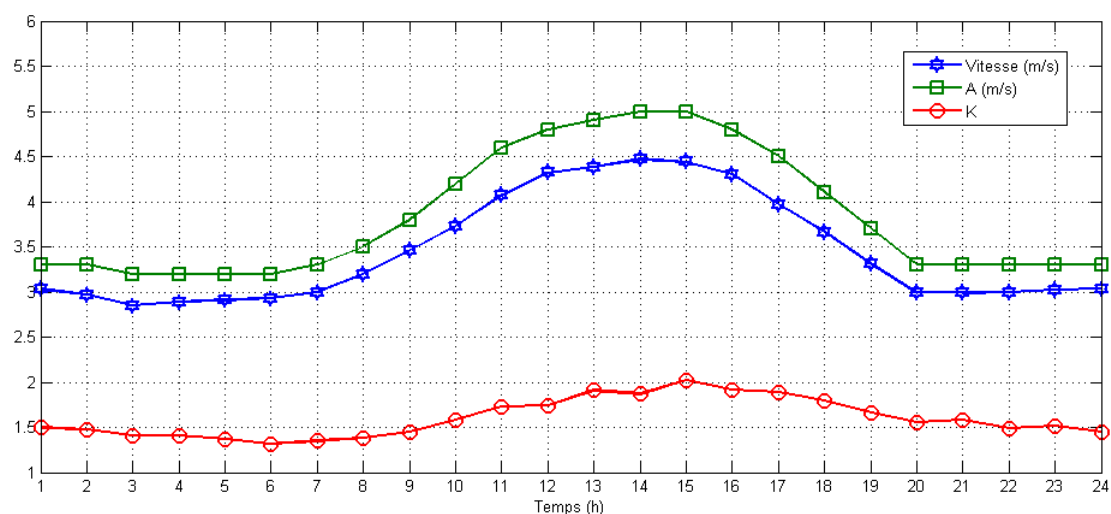


FIGURE 2.26 – Moyenne horaire de la vitesse et des paramètres de weibull à 10m dans la région de Troyes Barberey

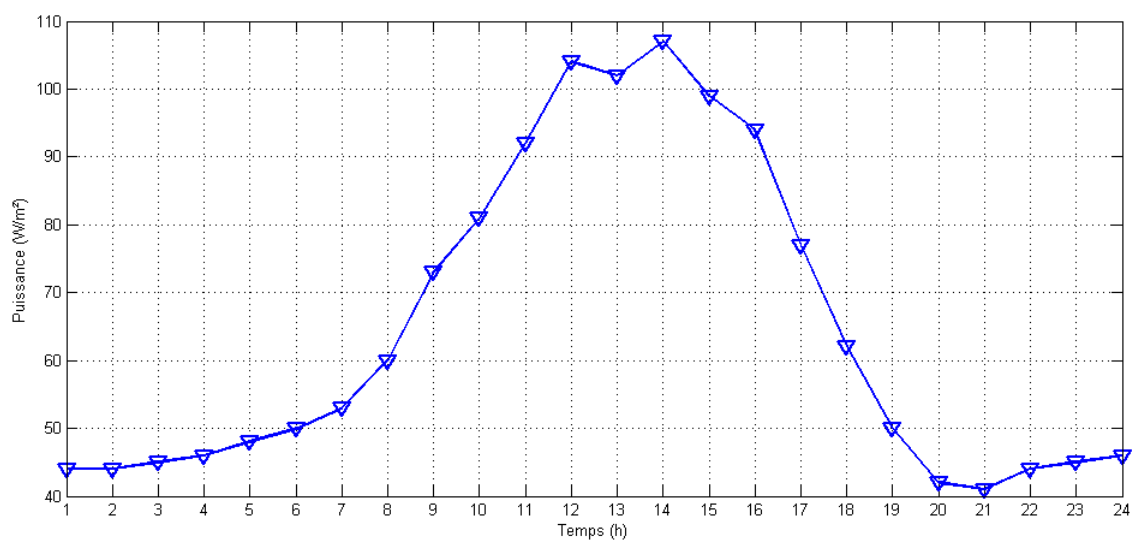


FIGURE 2.27 – Puissance horaire pour une éolienne à axe verticale à 10m dans la région de Troyes Barberey

3. Les limites de l'état de chargement des batteries

Pour tous les scénarios l'état de chargement des batteries doit satisfaire la condition suivante :

$$SOC_{bmin}(t) \leq SOC_b(t) \leq SOC_{bmax}(t) \quad (2.34)$$

Avec SOC_{bmax} et SOC_{bmin} sont les états limites de chargement des batteries de stockage. SOC_{bmax} est considérée comme la capacité nominale du système de stockage

$SOC_{b_{min}}$ et la limite inférieure peut être exprimée par :

$$SOC_{b_{min}} = (1 - DOD) * SOC_{b_n} \quad (2.35)$$

avec DOD représente la profondeur de décharge des batteries, SOC_{b_n} représente l'état de charge nominale d'une batterie, et la limite supérieure est exprimée par :

$$C_{b_{max}} = \omega * SOC_{b_n} \quad (2.36)$$

avec ω est un coefficient en %.

V. Convertisseurs

Dans un système hybride, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent utilisés : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le système hybride, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.
- Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.
- Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

Afin d'adapter la forme de l'énergie électrique délivrée par un composant de l'installation en fonction de l'application visée, un convertisseur statique lui sera nécessairement connecté. Les onduleurs jouent un rôle clé au regard de l'efficacité énergétique et de la fiabilité. Dans le cas d'un générateur photovoltaïque leur rôle ne se limite pas à transformer le courant continu (DC) généré par le panneau PV en courant alternatif (AC) de tension et de fréquence souhaitées (par ex. 230 V et 50 Hz), mais consiste également à exploiter le champ PV à son point de puissance maximale (Maximum Power Point MPP). De plus, les onduleurs doivent assurer une surveillance fiable du réseau pour le protéger contre les défaillances et interrompre l'alimentation en cas d'erreurs du réseau.

VI. Critère à optimiser

Nous présentons le modèle de ce problème en exprimant analytiquement le critère à optimiser. Le critère considéré est le critère économique qui se compose de : la somme des coûts d'achat du système, coût de maintenance et le coût de renouvellement des composants.

0.1. Le coût d'achat du système

Il est lié au coût d'achat du système ainsi que son installation :

$$C_a = N_{pv} * C_{pv} + N_{wg} * C_{wg} + N_{bat} * C_{bat} + N_{con} * C_{con} \quad (2.37)$$

Avec : C_{wg} : Le coût d'achat du système éolien.

C_{pv} : Le coût d'achat du système photovoltaïque.

C_{bat} : Le coût d'achat du système de stockage.

C_{con} : Le coût d'achat de convertisseur.

N_{pv} : nombre des panneaux photovoltaïques.

N_{wg} : le nombre des éoliennes

N_{bat} : le nombre des batteries

et N_{con} : le nombre des convertisseurs.

0.2. Le coût de maintenance

Le coût de maintenance de système hybride est décrit sous cette forme :

$$C_m = (N_{pv} * M_{pv} * H) + (N_{wg} * M_{wg} * H) + ((H - Y_{bat} - 1) * N_{bat} * M_{bat}) + (H - Y_{con} - 1) * N_{con} * M_{con} \quad (2.38)$$

Avec : M_{pv} , M_{wg} , M_{bat} et M_{con} : sont respectivement le coût de maintenance d'un panneau photovoltaïque, d'une éolienne, d'une batterie et d'un convertisseur.

H : Durée de vie du système.

Y_{bat} : Le nombre de changements d'une batterie durant H .

Y_{con} : Le nombre de changements d'un convertisseur durant H .

0.3. Le coût de renouvellement des composants

Chaque composant de système a une durée de vie, ensuite il doit être remplacé sur toute la durée de fonctionnement du système (H).

$$C_r = N_{pv} * (C_{pv} * (Y_{pv})) + N_{wg} * (C_{wg} * (Y_{wg})) + N_{bat} * (C_{bat} * (Y_{bat})) + N_{con} * (C_{con} * (Y_{con})) \quad (2.39)$$

Y_{pv} : Le nombre des changements d'un panneau photovoltaïque durant H .

Y_{wg} : Le nombre de changements d'une éolienne durant H .

Y_{bat} : Le nombre de changements des batteries durant H .

Y_{con} : Le nombre de changements des convertisseurs durant H .

avec :

$$Y_{pv} = \lceil (H - H_{pv}) / H_{pv} \rceil \quad (2.40)$$

$$Y_{wg} = \lceil (H - H_{wg}) / H_{wg} \rceil \quad (2.41)$$

$$Y_{bat} = \lceil (H - H_{bat}) / H_{bat} \rceil \quad (2.42)$$

$$Y_{con} = \lceil (H - H_{con})/H_{con} \rceil \quad (2.43)$$

H_{pv} : la durée de vie d'un panneau photovoltaïque.

H_{wg} : la durée de vie d'une éolienne.

H_{bat} : la durée de vie d'une batterie.

et H_{pv} : la durée de vie d'un convertisseur.

0.4. Le coût total

Généralement le générateur éolien et le générateur photovoltaïque ont une durée de vie proche de la durée de vie du système donc un coût de remplacement nul.

Le coût globale pour toute la durée de fonctionnement est donné par :

$$C_t = C_a + C_m + C_r \quad (2.44)$$

L'optimisation du dimensionnement d'un système hybride est basée sur le critère économique (coût C_t) qui peut être écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \min(z) &= N_{pv} * (C_{pv} + H * M_{pv}) + N_{wg} * (C_{wg} + H * M_{wg}) \\ &+ N_{bat} * [C_{bat} * (1 + Y_{bat}) + (H - Y_{bat} - 1) * M_{bat}] \end{aligned} \quad (2.45)$$

1. Contraintes

La puissance délivrée par les PV , celle délivrée par les éoliennes et celle délivrée par les batteries doivent être supérieure à la demande pour chaque période t .

$$P_{pv}(t, \theta) * N_{pv} + P_{wg}(t) * N_{wg} + S_b(t) * N_{bat} \geq E_d(t) \quad \forall t \in H \quad (2.46)$$

Pour calculer le nombre des changements des batteries, deux méthodes sont utilisés dans la littérature.

- [Al-Shammaa and Addoweesh, 2012],[Arabali et al., 2013] considèrent que la durée de vie d'une batterie est constante donc le nombre de changements est donné par l'équation : (2.47).

$$\lceil Y_{bat} = H/L_{bat} \rceil \quad (2.47)$$

- La durée de vie réelle d'une batterie est un nombre de cycles de charges/décharges N_{cyc} , qui doit être utilisé dans une période bien connu :

$$Y_{bat} \leq H1 \quad (2.48)$$

avec $H1$ est la durée de vie maximale d'une batterie même si le nombre de charges décharges n'est pas encore atteint.

$$Y_{bat} = \lceil (N_{cyc}^{tot} - 1)/N_{cyc} \rceil \quad (2.49)$$

Avec N_{cyc}^{tot} est le nombre totale de cycles charge/décharge durant H. Le nombre de toutes les composantes du système hybride est positif, selon l'espace dont est possible d'intervenir avec le système hybride, ce nombre est borné.

$$\begin{aligned}
0 &\leq N_{pv} \leq N_{pv,max} \\
0 &\leq N_{wg} \leq N_{wg,max} \\
0 &\leq N_{bat} \leq N_{bat,max} \\
0 &\leq N_{inv} \leq N_{inv,max}
\end{aligned}
\tag{2.50}$$

Le modèle complet tenant en compte les équations (2.31),(2.33),(2.34),(2.35),(2.36) vu dans la partie modélisation mathématique du stockage est le suivant :

N_{pv} : nombre des panneaux photovoltaïques.

N_{wg} :le nombre des éoliennes

N_{bat} :le nombre des batteries

N_{con} : le nombre des convertisseurs.

θ : l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïque.

S_b : l'état de charge d'une batterie.

VII. Conclusion

L'objectif principal de ce dimensionnement est de déterminer la configuration optimale de la centrale hybride éolienne, photovoltaïque et stockage pour satisfaire la demande. Plusieurs méthodes de dimensionnement des systèmes d'énergies hybrides existent [Al-Shammaa and Addoweesh, 2012],[Kaabeche et al., 2006], celle que nous allons utiliser se base sur le principe économique. Ensuite pour résoudre le problème de dimensionnement nous allons mettre à profit des heuristiques (Algorithme génétique et optimisation à sain particuliers "PSO") hybridé avec la logique floue afin de trouver une meilleure configuration.

Chapitre 3

Dimensionnement d'un système hybride non connecté au réseau

I. Introduction

Lorsque l'on cherche à optimiser le dimensionnement d'un système hybride non connecté au réseau, le but est de déterminer les paramètres de dimensionnement du système afin de minimiser un critère de coût. Bien évidemment, ce dimensionnement sera réalisé de façon à répondre à un certain critère de qualité du service rendu au consommateur. Dans la plupart des cas, le critère de coût retenu est un critère économique : on cherchera donc à minimiser le coût économique du système. Il est possible de distinguer deux principales méthodes de dimensionnement : méthodes déterministes et méthodes stochastiques.

1. Optimisation difficile

Les méthodes de résolution exacte ne sont pas adaptées à toutes les problématiques, et donc certains problèmes sont trop complexes à résoudre par ces méthodes. Parmi ces problématiques, nous pouvons citer l'existence de discontinuités, l'absence de convexité stricte, la non-dérivabilité, la présence de bruit ou encore la fonction objectif peut ne pas être définie analytiquement. En outre, les méthodes de résolution exacte peuvent avoir un temps de résolution trop long. Dans ce cas, le problème d'optimisation est dit "np-difficile", car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre en un temps raisonnable. Il est alors nécessaire d'avoir recours à des heuristiques de résolution dites méthodes approchées, qui fournissent un résultat sans garantie de l'optimalité.

II. Les méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation peuvent être scindées en deux grandes familles selon le mode de recherche de l'optimum :

1. Les méthodes déterministes

Comme leur nom l'indique, pour un problème donné et pour un point de départ donné, ces méthodes convergent toujours vers le même optimum. Cette famille peut

être, à son tour, scindée en deux sous-familles :

1.1. Méthodes gradient

La recherche de l'optimum est orientée à l'aide du calcul des dérivées partielles de la fonction objectif, permettant de « plonger » rapidement dans la direction de l'optimum le plus proche. Parmi ces méthodes nous citons notamment la technique de la plus grande pente (steepest descent), les méthodes de Newton ou quasi-Newton (BFGS ou DFP), la méthode de Levenberg-Marquardt [Abdelli, 2007].

Ces méthodes présentent principalement trois inconvénients :

- Elles nécessitent le calcul des dérivées partielles qui ne sont pas toujours évidentes à obtenir notamment dans les cas de modèles numériques où leur évaluation par différences finis n'est pas aisée.
- Elles ne garantissent réellement qu'une convergence « locale » et se laissent aisément « piégé » par des optima locaux dans le cas de problèmes multimodaux. Cette caractéristique oblige généralement le concepteur à réaliser plusieurs optimisations avec des configurations initiales distinctes pour s'assurer de la convergence.
- Elles sont applicables à des problèmes continus, elles ne permettent donc pas de tenir compte directement d'éventuels paramètres discrets tels que le nombre de panneaux photovoltaïques où le nombre des éoliennes.

Les méthodes gradient présentent toutefois deux avantages très intéressants. Le premier est qu'elles convergent rapidement surtout quand on dispose d'une expression symbolique exacte des dérivées partielles [Wurtz, 1996]. Le second est qu'elles possèdent des critères de convergence exacts. Il est donc possible de dire avec quelle précision un optimum est atteint. Ceci permet d'obtenir de bonnes solutions en ajustant la précision de convergence.

1.2. Les méthodes géométriques ou heuristiques

L'utilisation de méthodes exactes n'est pas toujours possible pour un problème donné à cause d'un certain nombre de contraintes, telles que le temps de calcul souvent important ou bien la difficulté, voire l'impossibilité dans certains cas, d'une définition séparée du problème. Pour faire face à ces contraintes, nous utilisons des méthodes approchées, appelées heuristiques. Le terme heuristique dérive du grec ancien "heuristique" et signifie « trouver ». Il qualifie tout ce qui sert à la découverte et à l'exploitation.

Ces méthodes utilisent uniquement les valeurs de la fonction objectif. Elles explorent l'espace des solutions par essais successifs en recherchant les directions les plus favorables. Comme pour les méthodes gradient, la convergence des méthodes géométriques reste « locale » mais la robustesse est meilleure, en particulier si la fonction à optimiser est faiblement bruitée ou discontinue. Le principal inconvénient de ces méthodes réside dans l'augmentation du coût de calcul lorsque le nombre de variables de conception augmente.

Il y a une multitude d'heuristiques qui ont déjà été proposées dans la littérature. Nous pouvons citer des heuristiques très simples telles que les algorithmes gloutons [DeVore and Temlyakov, 1996] ou les approches par amélioration itérative [DeVore and Temlyakov, 1996]. Le principe des méthodes gloutonnes est de faire une succession de choix optimaux localement, jusqu'à ce que l'on ne puisse plus améliorer la solution, et ce, sans retour en arrière possible.

2. Les méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques sont basées sur une prospection aléatoire de l'espace des solutions à l'aide de règles de transition probabilistes. Ainsi, pour des optimisations distinctes avec les mêmes configurations de départ, le trajet vers l'optimum peut être différent. Parmi les algorithmes stochastiques couramment utilisés pour la gestion de l'énergie et le dimensionnement d'un système hybride, le recuit simulé [Ha, 2007], les algorithmes génétiques [Duflo-Lopez and Bernal-Agustín, 2005], [Al-Shammaa and Addoweesh, 2012] et l'optimisation par essais particuliers (PSO) [Hameed et al., 2012] sont sans doute les plus populaires.

2.1. Les algorithmes génétiques

Un algorithme génétique (AG) est une métaheuristique qui manipule une population de solutions potentielles à la fois. Le mode de fonctionnement d'un AG est calqué sur les principes biologiques de la sélection naturelle et de la survie des individus les mieux adaptés à l'environnement [Darwin, 1876]. La sélection naturelle est basée sur l'idée que les modifications des générations successives sont orientées par les pressions extérieures auxquelles sont soumises les espèces (e.g., la limitation des ressources, les modifications de l'environnement, les prédateurs et parasites, etc.). Il en résulte que les individus les mieux adaptés à l'environnement tendent à survivre plus longtemps et à se reproduire plus fréquemment. S'inspirant ainsi de ce mécanisme, [Holland, 1975] a posé les bases de la technique d'optimisation appelée "algorithmes génétiques". Suite aux résultats proposés par cette technique, de très nombreux travaux sur les problèmes d'optimisation combinatoire ont été traités.

L'algorithme génétique est une technique d'optimisation inspirée de la sélection naturelle et de la génétique. L'algorithme part d'un ensemble de solutions possibles initialisé aléatoirement dans l'espace de recherche. Les individus sont représentés par leurs variables de conception ou par un codage de celles-ci (chromosome). Certaines solutions de la première population sont utilisées pour former, à partir d'opérateurs génétiques (croisement, mutation, etc.), une nouvelle population. Ceci est motivé par l'espoir que la nouvelle population soit meilleure que la précédente. Les solutions qui serviront à former de nouvelles solutions sont sélectionnées aléatoirement d'après leur mérite (représenté par une « fonction objectif » spécifique au problème posé, qui devra être minimisée ou maximisée) : meilleur est l'individu, plus grandes seront ses chances de survivre et de se reproduire, jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit satisfait (typiquement un nombre de générations fixé ou une valeur cible atteinte par la fonction

objectif).

Parmi les avantages des algorithmes génétiques, nous pouvons mentionner :

- La généralité de la méthode applicable aussi bien aux problèmes continus qu'aux problèmes discrets ou mixtes.
- Ils n'utilisent que la valeur de la fonction objectif (et non pas sa dérivée ou un calcul intermédiaire).
- Les éventuelles discontinuités de la fonction objectif ont peu d'effet sur la convergence de ces algorithmes.
- Ils se laissent difficilement piéger par des optima locaux.
- Ils peuvent traiter un grand nombre de paramètres, et sont très bien adaptés au calcul parallèle.

Toutes ces caractéristiques contribuent à ce que les algorithmes génétiques soient efficaces pour une grande variété de problèmes d'optimisation

Les AG utilisent principalement trois types d'opérateurs génétiques qui sont le "croisement", la "mutation" et la "sélection". Ces opérateurs sont appliqués aux individus de la population avec l'espoir d'améliorer leurs caractéristiques génétiques et de les amener à s'adapter à leur environnement.

1. Le croisement

De façon classique, le croisement s'opère à partir de deux parents pour générer deux enfants, en espérant que les enfants seront meilleurs que les parents si les bons caractères génétiques de ces derniers sont combinés. Il permet en fait d'exploiter les solutions courantes lors de la recherche. La figure 3.1 montre un exemple de croisement de deux parents codés en binaire. Un site de croisement est déterminé aléatoirement dans le chromosome des deux parents et deux nouveaux chromosomes enfants sont alors créés en échangeant tous les bits compris dans les portions avant le site de croisement.

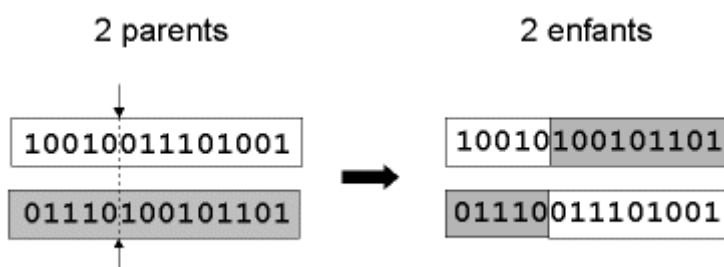


FIGURE 3.1 – représentation schématique du croisement en 1 point

L'application du croisement s'effectue suivant la probabilité p_c définie par l'utilisateur, et qui indique si deux parents sélectionnés aléatoirement subiront le croisement.

2. La mutation

Elle est généralement appliquée après le croisement des parents et aide à fournir de nouvelles caractéristiques génétiques, difficiles à obtenir par le seul opérateur de croisement. La figure 3.2 illustre le principe de la mutation d'un gène.

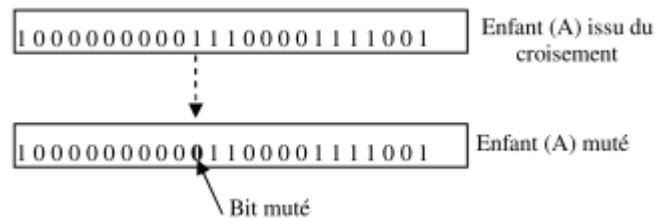


FIGURE 3.2 – Mutation d'un gène

Elle consiste à altérer un ou plusieurs gènes du chromosome d'un enfant donné, introduisant de ce fait une diversité dans la structure de la population. Cet opérateur permet ainsi l'exploration de l'espace des solutions. Il est caractérisé par la probabilité de mutation p_m qui détermine si un enfant doit subir une mutation.

3. La sélection

La sélection des meilleurs individus pour former la nouvelle population est cruciale, car il requiert de définir la notion de "meilleur" pour chaque problème donné. Pour les AG classiques, cette notion est généralement liée la valeur de la fonction d'adaptation. Les individus qui sont sélectionnés pour former la nouvelle génération le sont donc en fonction de leur adaptation (ou fitness). Ainsi, un individu a d'autant plus de chance d'être sélectionné qu'il présente une performance élevée. Deux éléments guident le processus d'évolution de la population dans les AG [Michalewicz, 1996]. Il s'agit de la pression de sélection et de la diversité de la population. La pression de sélection définit en quelque sorte le degré d'adaptation que doit avoir un chromosome pour être sélectionné comme une solution prometteuse. La diversité de la population se mesure par la similitude des gènes des chromosomes. Plus la population comporte des chromosomes qui se ressemblent, moins on explore l'espace des solutions. Ces deux facteurs sont intimement liés car l'augmentation de la pression de sélection entraîne la diminution de la diversité génétique de la population et vice versa. En d'autres termes, une forte pression de sélection peut entraîner une convergence prématurée vers une solution non optimale tandis qu'une pression de sélection faible rendra la recherche de la solution aléatoire et inefficace.

Le principe de fonctionnement d'un AG est illustré par le diagramme de la figure 3.3 [El Dor, 2012].

Il part d'une population initiale générée aléatoirement, où chaque individu de la population représente une solution possible du problème. À chaque génération (ou itération), les meilleurs individus sont sélectionnés pour former le bassin des parents reproducteurs. Des tirages au sort sont effectués pour sélectionner

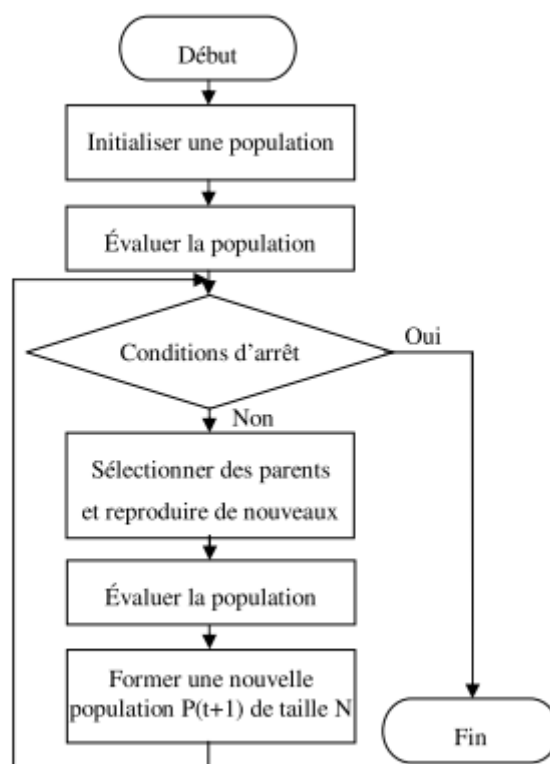


FIGURE 3.3 – Algorithme génétique

aléatoirement les parents deux à deux, à qui on applique l'opérateur de croisement pour créer des enfants. De temps en temps les gènes de certains enfants subissent une mutation contribuant ainsi à une diversification du bassin génétique de la population. Les enfants générés à la suite du croisement des parents seront utilisés pour constituer une nouvelle population et le cycle recommence. Le cycle est arrêté quand le critère d'arrêt spécifié est atteint (e.g., le nombre de générations, la faible variation de la fonction objectif pendant plusieurs génération, etc.). Les AG utilisent aussi un concept très important appelé "l'élitisme" [Golberg, 1989], qui consiste à garder un échantillon des gènes des meilleurs individus afin de se prémunir contre toute détérioration que pourrait engendrer le croisement ou la mutation.

Les probabilités de croisement P_c , de mutation P_m et d'élitisme P_e sont fixés au début de l'algorithme génétique. Ces probabilités normalement sont déterminées de manière empirique. Cependant, la valeur de probabilité de P_c doit être supérieure à la probabilité de P_m [Golberg, 1989]. P_m peut être fixé avec une valeur faible afin d'éviter une introduction trop grande de nouvelle information dans la population.

2.2. Optimisation par essais particuliers

La résolution satisfaisante d'un problème d'optimisation difficile, qui comporte un grand nombre de solutions sous-optimales, justifie souvent le recours à une

métaheuristique puissante. La majorité des algorithmes utilisés pour résoudre ces problèmes d'optimisation sont les métaheuristiques à population. Parmi celles-ci, nous intéressons à l'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP, ou PSO en anglais) qui est apparue en 1995 [Kennedy et al., 1995]. PSO s'inspire de la dynamique d'animaux se déplaçant en groupes compacts (essaims d'abeilles, vols groupés d'oiseaux, bancs de poissons). Les particules d'un même essaim communiquent entre elles tout au long de la recherche pour construire une solution au problème posé, et ce en s'appuyant sur leur expérience collective. PSO présente l'avantage d'être efficace sur une grande variété de problèmes, sans pour autant que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, « survole » l'espace de recherche, à la recherche de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

1. Une composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
2. Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
3. Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure 3.4.

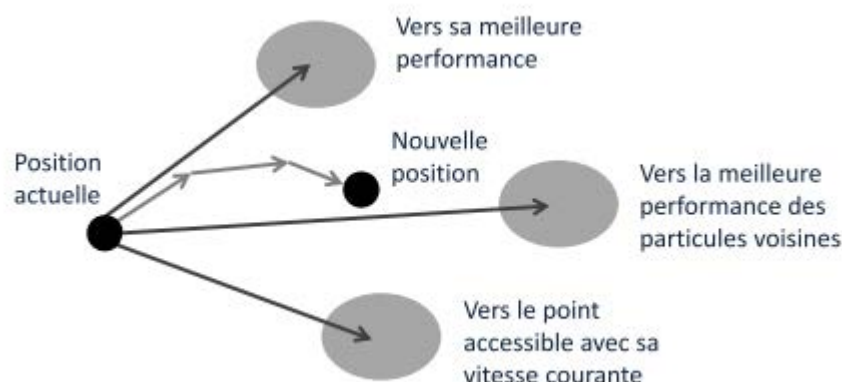


FIGURE 3.4 – Déplacement d'une particule.

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{v}_i =$

$(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\overrightarrow{Pbest}_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{iD})$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\overrightarrow{Gbest}_i = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D)$. Nous nous référons à la version globale de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation \overrightarrow{Gbest} (global best).

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées ci-dessus. En effet, à l'itération $t + 1$, le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés à partir de l'équation 3.1 et de l'équation 3.2, respectivement.

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{ij}^t + c_1 r_1 * (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 * (gbest_d^t - x_{id}^t) \quad (3.1)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (3.2)$$

où w , c_1 et c_2 sont des constantes, appelées respectivement coefficient d'inertie et coefficients d'accélération ; r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$, à chaque itération t et pour chaque dimension d .

Les trois composantes mentionnées ci-dessus (i.e. d'inertie, cognitive et sociale) sont représentées dans l'équation 3.1 par les termes suivants :

- $w * v_{ij}^t$ correspond à la composante d'inertie du déplacement, où le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur.
- $c_1 r_1 * (pbest_{id}^t - x_{id}^t)$ correspond à la composante cognitive du déplacement, où le paramètre $c1$ contrôle le comportement cognitif de la particule.
- $c_2 r_2 * (gbest_d^t - x_{id}^t)$ correspond à la composante sociale du déplacement, où le paramètre $c2$ contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées et les deux vecteurs \overrightarrow{Pbest}_i et \overrightarrow{Gbest} sont mis à jour , à l'itération $t + 1$, suivant les deux équations 3.3 (dans le cas d'une minimisation) et 3.4 (dans une version globale de PSO), respectivement.

$$\overrightarrow{Pbest}_i^{t+1} = \overrightarrow{Pbest}_i^t \text{ si } f(\vec{x}^{t+1}) \geq \overrightarrow{Pbest}_i^t \text{ sinon } \overrightarrow{Pbest}_i^{t+1} = f(\vec{x}^{t+1}) \quad (3.3)$$

$$\overrightarrow{Gbest}^{t+1} = \min(\overrightarrow{Pbest}_i^{t+1}) \quad (3.4)$$

III. Logique floue

La logique floue est une technique utilisée en intelligence artificielle. Son domaine d'application est aussi varié que la robotique, la gestion de la circulation routière,

le contrôle aérien, l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie, analyse du cycle de vie), la médecine (aide au diagnostic) etc... Ces bases théoriques ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, [Zadeh, 1965]. Il a introduit la notion de sous ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites. Dès 1975, Mamdani a exploité cette théorie dans des systèmes de réglage[Mamdani and Assilian, 1975]. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, il a obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type PID. Le système flou passe généralement par quatre étapes principales comme le montre la figure 3.5.

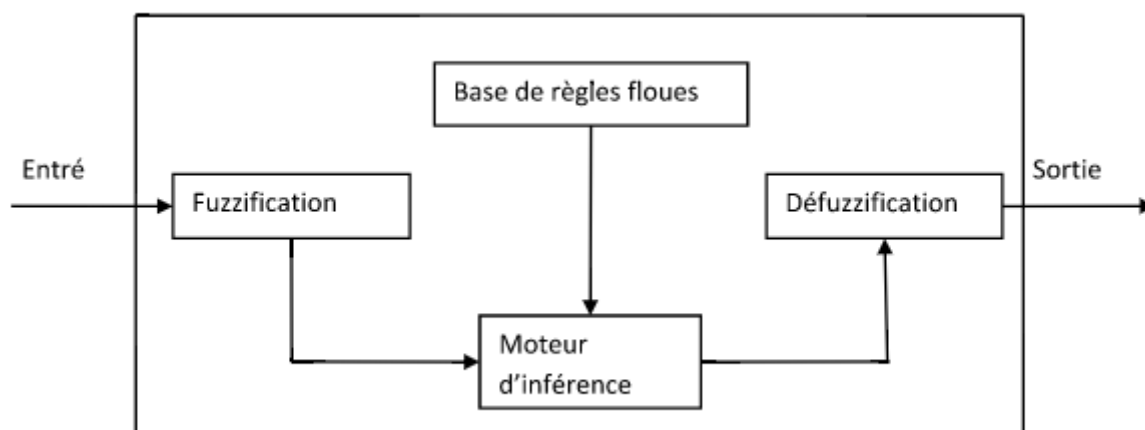


FIGURE 3.5 – Système floue

La description de chacune de ces étapes est donnée par :

1. Fuzzification

Les variables d'entrée et de sortie choisies pour modéliser ou commander un système sont des grandeurs numériques. L'étape de fuzzification consiste à transformer ces grandeurs réelles en variables linguistiques en vue d'un traitement d'inférence. Ainsi, à chaque variable d'entrée est associé des ensembles caractérisant les termes linguistiques pris par ces variables. Ces termes seront utilisés pour écrire les règles d'inférence. Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions d'appartenance, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartissent autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes.

2. La base de règles

Une base de règles floues est une collection de règles qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie. La description de la commande se fait par l'intermédiaire de ces règles qui ont la forme suivante :

$$\textit{si premisses alors conclusion} \tag{3.5}$$

3. Méthode d'inférence floue

Méthode d'inférence floue : Elle permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande et se fait par les opérations d'inférence floue et l'agrégation des règles. Dans le cadre de cette thèse, on s'intéressera aux systèmes flous de type Takagi-Sugeno à conclusion constante dont la base de règles pour des entrées x_1, \dots, x_n et sortie y , peut être décrite comme suit :

$$\begin{aligned} \textit{si } x_1 \textit{ est } A_1^1 \textit{ Et } x_2 \textit{ est } A_2^1 \textit{ Et...Et } x_n \textit{ est } A_n^1 \textit{ Alors } y^1 &= c^1 \\ \textit{si } x_1 \textit{ est } A_1^2 \textit{ Et } x_2 \textit{ est } A_2^2 \textit{ Et...Et } x_n \textit{ est } A_n^2 \textit{ Alors } y^2 &= c^2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \textit{si } x_1 \textit{ est } A_1^m \textit{ Et } x_2 \textit{ est } A_2^m \textit{ Et...Et } x_n \textit{ est } A_n^m \textit{ Alors } y^m &= c^m \end{aligned} \tag{3.6}$$

Où A_j^i est l'ensemble flou correspond à la i ème entrée x_i , c_j est un singleton, y_j est la sortie de la j ème règle et m est le nombre de règles floues utilisées. Avec la méthode d'inférence "somme-prod", les opérateurs "Ou" et "Et" sont réalisés respectivement par la somme algébrique et le produit. La relation entre la prémisses et la conclusion "Alors" est traduite par le produit. L'agrégation des règles définies par "Ou" est obtenue par la somme algébrique.

4. Défuzzification

Le traitement des règles d'inférence fournit une valeur floue. L'étape de défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise à appliquer au processus. Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour réaliser cette opération :

- Le centre de gravité.
- La méthode de la hauteur.
- La méthode de la hauteur modifiée.
- La méthode de la valeur maximum.
- La méthode de la moyenne des centres.

$$\textit{si } x_1 \textit{ est } A_1^l \textit{ Et } x_2 \textit{ est } A_2^l \textit{ Et...Et } x_n \textit{ est } A_n^l \textit{ Alors } y = f^l(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{3.7}$$

avec $l = 1, 2, \dots, K$ La méthode utilisée pour la défuzzification est obtenue par une simple moyenne pondérée selon les niveaux d'activation w^l de chacune des règles.

$$u = \frac{\sum_{l=1}^K w^l f^l(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sum_{l=1}^K w^l} \quad (3.8)$$

Dans le reste de la thèse, on utilise la méthode de la moyenne des centres.

IV. Travail développé

Un AG et un PSO présentent des bons candidats pour étudier le problème de dimensionnement d'un système hybride. En effet on a vu que le dimensionnement est un problème d'optimisation pour les données de grand taille, dans notre cas les données météorologiques et les combinaisons de solutions possibles sont de grande dimension. Lorsque le nombre de possibilités est trop élevé et que le nombre d'échantillons est limité, il est important de procéder à une phase de sélection de gènes pour une tâche de classification supervisée. Ces deux algorithmes ont une grande capacité d'effectuer des recherches dans un grand espace de solutions. Il est légitime d'utiliser des heuristiques pour parcourir cet espace de recherche avec une complexité limitée. Pour cela nous proposons d'utiliser un contrôleur flou, dans une première étape, pour contrôler le type de croisement et le pourcentage de mutation d'un algorithme génétique, et dans une deuxième étape, pour contrôler les deux paramètres de coefficients d'accélération d'un PSO, pour la recherche d'un bon sous-ensemble parmi une population de gènes qui évoluent au cours de temps afin de maximiser la performance de classification.

1. Codage des solutions et fonction Fitness

1.1. Codage des solutions

La première étape d'un algorithme génétique est de représenter convenablement les variables de décision du problème à traiter. Un des facteurs les plus importants, si ce n'est le plus important, est la façon dont sont codées les solutions (les chromosomes), c'est-à-dire les structures de données qui coderont les gènes. Le choix du codage dépend de la spécificité du problème et conditionne fortement l'efficacité de l'algorithme. Une représentation de la solution devrait être complète, ce qui signifie que toutes les solutions possibles au problème peuvent être codées à l'aide de cette représentation.

Dans notre cas d'étude, les variables de décision du problème considérées sont : le nombre des panneaux photovoltaïques, le nombre des éoliennes, le nombre de batteries, l'angle d'inclinaison des panneaux et le nombre des convertisseurs. Donc chaque chromosome peut être codé avec une matrice de nombres binaires, toutes les variables sont des entiers sauf l'angle d'inclinaison qui est encadré entre 18.546 degré le 21 décembre

et 65.085 degré le 21 Juin à Barbery-Troyes. et on le calcule comme suit :

$$\theta = 18.546 + \frac{\sum_{i=0}^{L-1} b * 2^i}{2^L - 1} * (65.085 - 18.546) \tag{3.9}$$

b est la valeur de chaque bit (soit 0 soit 1).

Chaque gène d'un chromosome (ligne de matrice) présente une variable, la dimension de chromosome est (nombre de variables*L) avec L la longueur de chromosome.

La figure 3.6 présente un exemple des solutions avec L=10

Npv	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
Nwg	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Nbat	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
Angle	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
Ncon	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1

FIGURE 3.6 – Représentation de chromosome

Chaque chromosome de l'algorithme génétique est évalué à travers une fonction appelée fonction Fitness. Dans la section suivante nous la définissons plus en détail.

1.2. Fonction Fitness

La fonction Fitness doit être capable d'interpréter les données contenues dans un chromosome (les gènes) et de lui attribuer une valeur numérique. A partir de ces valeurs numériques, une sélection des chromosomes est faite pour la reproduction par les opérateurs de croisement et de mutation. La solution dont les gènes ne forment pas une bonne solution se verra attribuer une mauvaise valeur de la fonction Fitness et aura une probabilité forte d'être éliminé par le processus de sélection. Cependant, il peut être intéressant de conserver certaines solutions de mauvaise valeur de la fonction Fitness car elles peuvent permettre de générer d'autres solutions, par les opérateurs de reproduction (croisement et mutation), admissibles et de bonne qualité. Dans notre cas, et pour simplifier le calcul, la fonction objective est utilisée comme fonction Fitness.

1.3. Génération de la population initiale

La population initiale est générée le plus souvent aléatoirement en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux variables de décision, tout en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes du problème. Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme génétique. Une connaissance de solutions de bonne qualité permettrait à l'algorithme de converger plus rapidement vers des solutions de bonne qualité. Ainsi, une voie prometteuse pour améliorer la population initiale est d'intégrer certains

chromosomes générés par des heuristiques. La taille de la population initiale (N) qui est un paramètre de l'algorithme génétique doit être choisi convenablement. Si cette taille est trop grande, l'algorithme risque de consommer beaucoup de temps à générer cette population. Dans le cas contraire, si elle trop petite l'algorithme risque de ne pas avoir assez de variété dans la population. Les chromosomes générés doivent être sans doublons afin de donner une bonne diversité à la population de départ.

Dans l'algorithme proposé, la population initiale se compose des N solutions en veillant à ce que toutes les solutions soient différentes. En effet, un test est fait à la fin de la procédure de création de la population initiale qui permet d'éliminer les doublons et les remplacer par d'autres solutions générées d'une manière aléatoires.

1.4. Selection

Une fois la population initiale est créée et évaluée, certains individus sont sélectionnés pour participer à la création de la nouvelle génération. Les individus peuvent être sélectionnés au moyen de plusieurs techniques que la littérature peut fournir dont nous citons : la sélection aléatoire, la sélection par tournois, la sélection $N/2$ -élitisme, la sélection par roulette et la sélection par rang [Batch, 1994].

Notre algorithme génétique considère deux phases de sélection :

- La sélection de reproduction, c'est la sélection des parents, qui détermine les individus qui vont subir les opérations de reproduction (croisement et mutation). La sélection est $N/2$ élitisme, elle consiste à sélectionner les $N/2$ meilleures solutions dans la population courante.
- La sélection de remplacement, la sélection de la nouvelle population concerne l'évolution de la population d'une génération à une autre. La taille de la population est fixée à N . Donc seulement N meilleures solutions sont gardées pour la population suivante. Elles sont choisies parmi les $N + N/2$ solutions (N parents de la population courante(Ensemble Parents) et $N/2$ enfants obtenus par la reproduction (Ensemblefils)). Cette sélection est donc élitiste. Il est à noter que les individus doublons sont supprimés à cette étape afin de maintenir une diversité suffisante de la population.

Dans la figure 3.7, un exemple d'opérateur de croisement, où la taille du chromosome (L) est égale à 10 et le croisement est au point 4, est montré.

1.5. Opérateur de mutation

L'objectif majeur d'un opérateur de mutation est d'apporter à l'algorithme génétique une diversification nécessaire pour une exploration efficace de l'espace de recherche. Sa mise en œuvre doit permettre à l'algorithme d'atteindre la plupart des sous-espaces de solution réalisables. En effet, la mutation joue le rôle d'un bruit et empêche l'évolution de se figer. Les propriétés de convergence d'un algorithme génétique sont fortement dépendantes de l'opérateur de mutation. Ce dernier est utilisé avec une probabilité, appelée probabilité de mutation, généralement choisie faible.

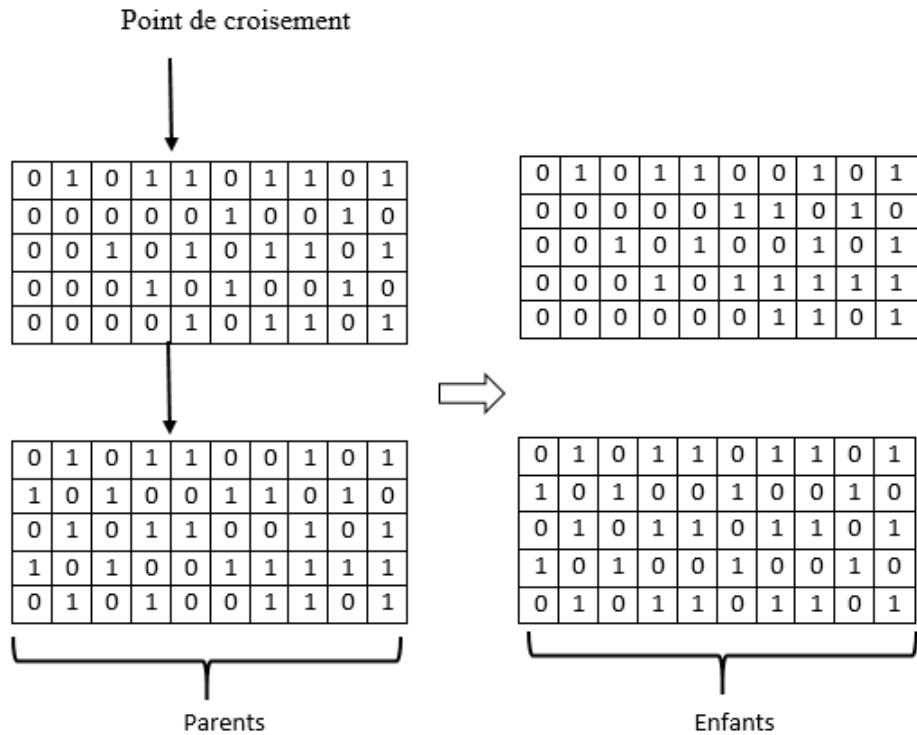


FIGURE 3.7 – Représentation de chromosome

Dans notre étude, chaque solution $X = (X_1, \dots, X_N)$ peut subir une modification aléatoire. La mutation concerne uniquement un gène du chromosome. Ce gène est sélectionné aléatoirement à chaque génération par une simple distribution uniforme.

2. Algorithme génétique hybridé avec le floue

Le problème à résoudre a un grand nombre de solutions possibles (combinaisons de panneaux solaires, éoliennes, batteries, angle d'inclinaison, et les variables de stratégie), pour cette raison, il est difficile de résoudre ce problème avec des méthodes mathématiques classiques. L'optimisation à l'aide des Algorithmes génétiques fournit un outil puissant pour obtenir une solution optimale pour ce problème de système hybride [Castro and Camargo, 2004]. Dans la première étape cet algorithme, un ensemble de solutions initiales (des populations initiales), choisie au hasard dans l'espace de solutions possibles. La fonction d'adaptation est évaluée pour chaque solution, et les solutions sont classés. La population évolue ensuite à travers plusieurs opérations, comme le croisement, la mutation pour obtenir la solution finale optimale. Le processus est répété jusqu'à ce qu'un critère soit satisfait 3.8. La classification est une tâche importante rencontrée dans divers domaines tels que : la reconnaissance, la prise de décision, l'exploration de données et la modélisation [van den Berg et al., 2002]. L'objectif de la classification est d'attribuer des classes à un ensemble d'instances de données, qui sont décrits par plusieurs attributs. Dans ce travail, les attributs ainsi les classes sont décrites par termes linguistiques définies par des ensembles flous. Nous avons deux paramètres d'entrée floue : "a" est le nombre de itérations où la valeur de la solution

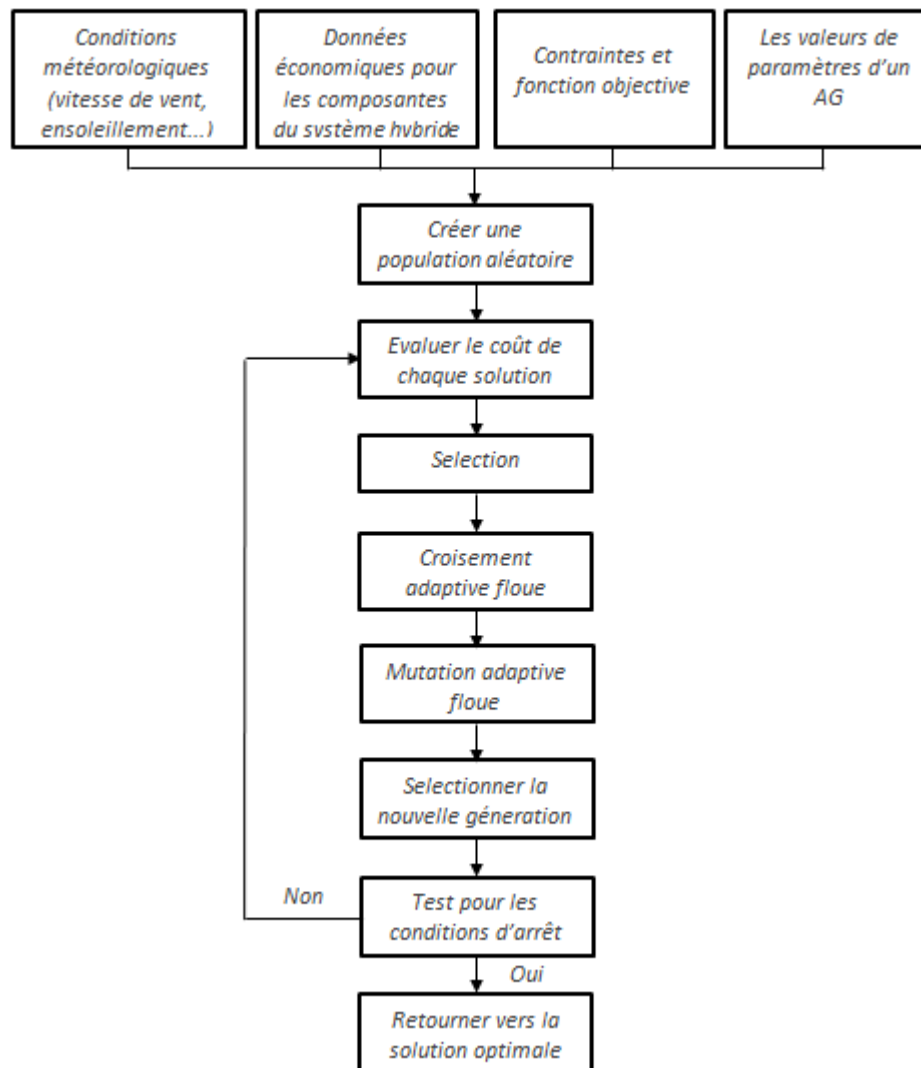


FIGURE 3.8 – Diagramme de l'AG développé

optimale est la même, et "d" est la différence entre la valeur maximale et minimale dans la même population pour avoir une idée sur la diversité. Pour éviter une convergence prématurée, les taux de croisement et de mutation doivent être modifiés pour introduire des nouvelles caractéristiques de l'algorithme génétique et pour réduire la perte de matériel génétique. Pendant les premières expériences, nous avons observé que l'algorithme converge rapidement à quelques minimum locaux, certains points l'espace de recherche n'ont pas été explorés. Le nombre de règles dans la base de connaissances est augmenté à 15, cinq classes de "a" et trois pour "D", pour éviter la convergence prématurée.

Les fonctions d'appartenance correspondant à chaque ensemble flou sont les suivantes :

Après avoir défini les variables d'entrée possibles, il est nécessaire de produire un système flou de réglage dynamique de croisement et la mutation. Pour les variables de

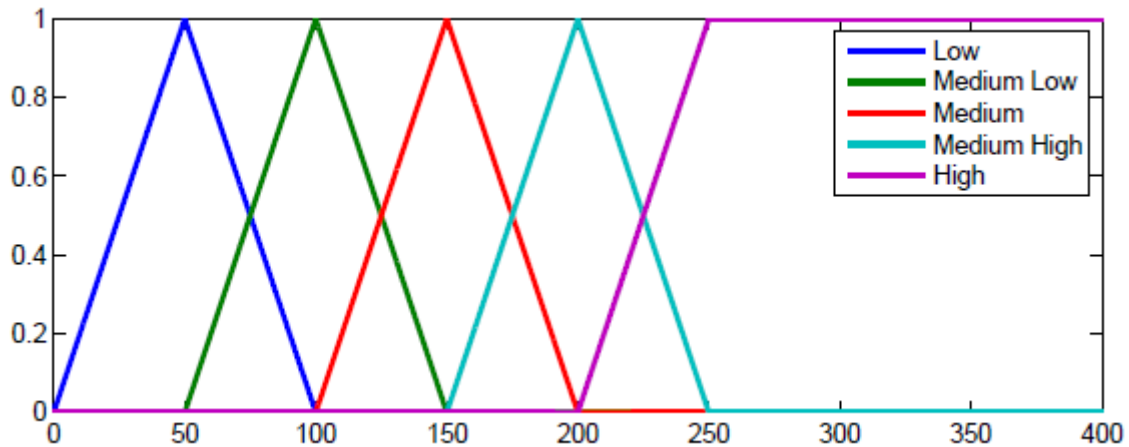


FIGURE 3.9 – Fonctions d'appartenance de l'Entrée 1 : "a"

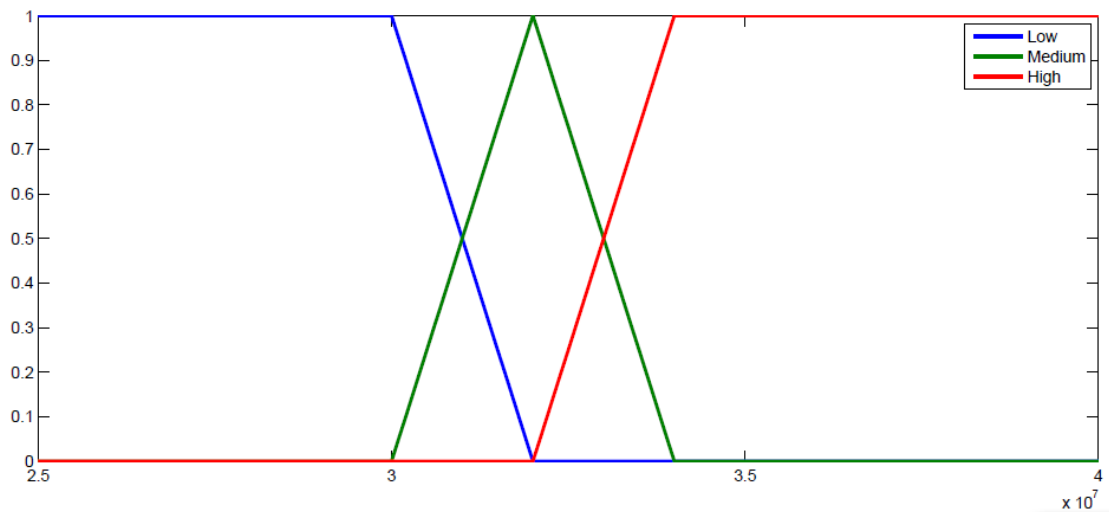


FIGURE 3.10 – Fonctions d'appartenance de l'Entrée 2 : diversité "d"

sortie, les valeurs utilisées pour le croisement sont comprises entre 1 et 7 (7 points de croisement 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8) et le pourcentage de mutation est entre 0 et 0.4, de sorte que ces variables ont été conçus en utilisant cette gamme de valeurs. Les sorties de croisement et de mutation sont granulés à sept et trois fonctions d'appartenance, la conception des variables de sortie peut être vu sur la figure 3.11,3.12 respectivement croisement et de mutation.

Pour la mise en œuvre des règles, nous avons eu recours aux règles floues de type Tagagi. Les différentes règles floues utilisées dans notre système sont résumées dans le tableau 3.13.

3. Résultats expérimentaux

Les tests consistent à exécuter l'algorithme sur 100 instances générées d'une manière aléatoire.

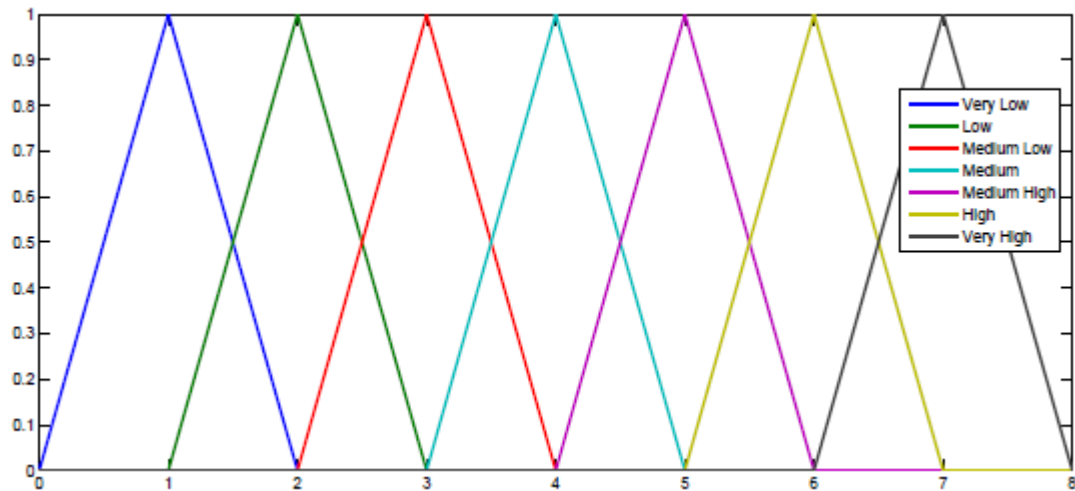


FIGURE 3.11 – Fonctions d'appartenance de Sortie 1 : Type de Croisement

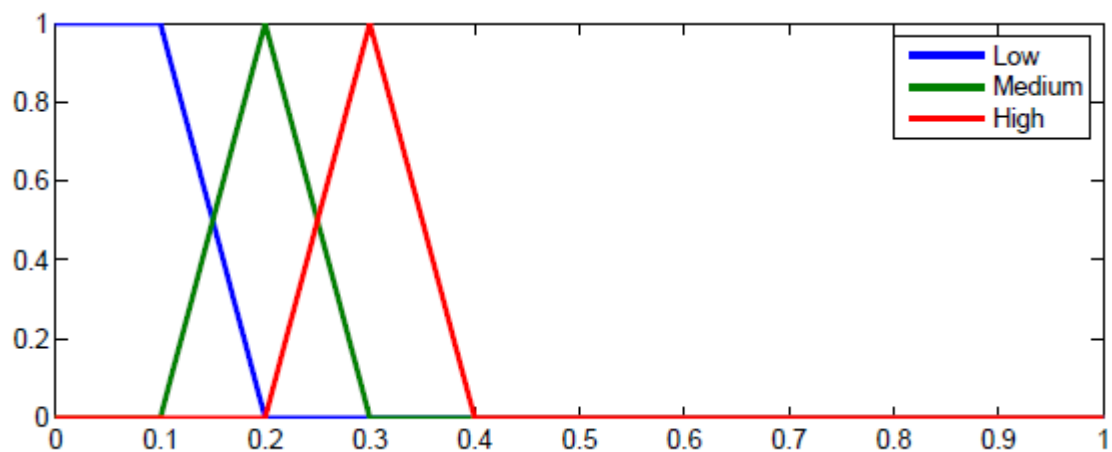


FIGURE 3.12 – Fonctions d'appartenance de Sortie 2 : Pourcentage de mutation

3.1. Conditions expérimentales

L'algorithme génétique a été implémenté en Matlab. Les tests ont été exécutés sur hp core i5 avec une fréquence de 3.2 Ghz et 4 GB de mémoire.

Après plusieurs tests préliminaires, les valeurs suivantes ont été choisies empiriquement comme paramètres de notre algorithme génétique : La taille de la population N est égale à 100 chromosomes. Le croisement est au point 5 pour l'algorithme génétique standard, et variable avec le contrôleur flou pour l'algorithme développé, et il peut être aux points 2, 3, 4, 5, 6, 7 où 8. La probabilité de mutation est égale à 0,10 pour l'algorithme génétique et variable avec le contrôleur flou entre 0 et 0.4.

Le nombre de générations (le test arrêt) est égal à 1000. Considérant le caractère stochastique de l'algorithme génétique, 100 lancements (un lancement ou run=une exécution de l'algorithme) indépendants ont été effectués pour chaque instance. La meilleure solution connue pour chaque test correspond à la solution optimale donnée

si a est petit et d est petit, cr est grand moyen et mut est grand
 si a est petit et d est moyen, cr est moyen et mut est petit
 si a est petit et d est grand, cr est moyen et mut est moyen

 si a est petit moyen et d est petit, cr est grand moyen et mut est grand
 si a est petit moyen et d est moyen, cr est moyen et mut est petit
 si a est petit moyen et d est grand, cr est petit moyen et mut est moyen

 si a est moyen et d est petit, cr est très grand et mut est grand
 si a est moyen et d est moyen, cr est moyen et mut est petit
 si a est moyen et d est grand, cr est très petit et mut est moyen

 si a est grand moyen et d est petit, cr est grand et mut est moyen
 si a est grand moyen et d est moyen, cr est moyen et mut est petit
 si a est grand moyen et d est grand, cr est petit et mut est grand

 si a est grand et d est petit, cr est grand moyen et mut est moyen
 si a est grand et d est moyen, cr est moyen et mut est petit
 si a est grand et d est grand, cr est petit moyen et mut est grand

FIGURE 3.13 – Règles du système flou pour l'algorithme génétique

par l'hybridation de l'algorithme génétique avec le flou.

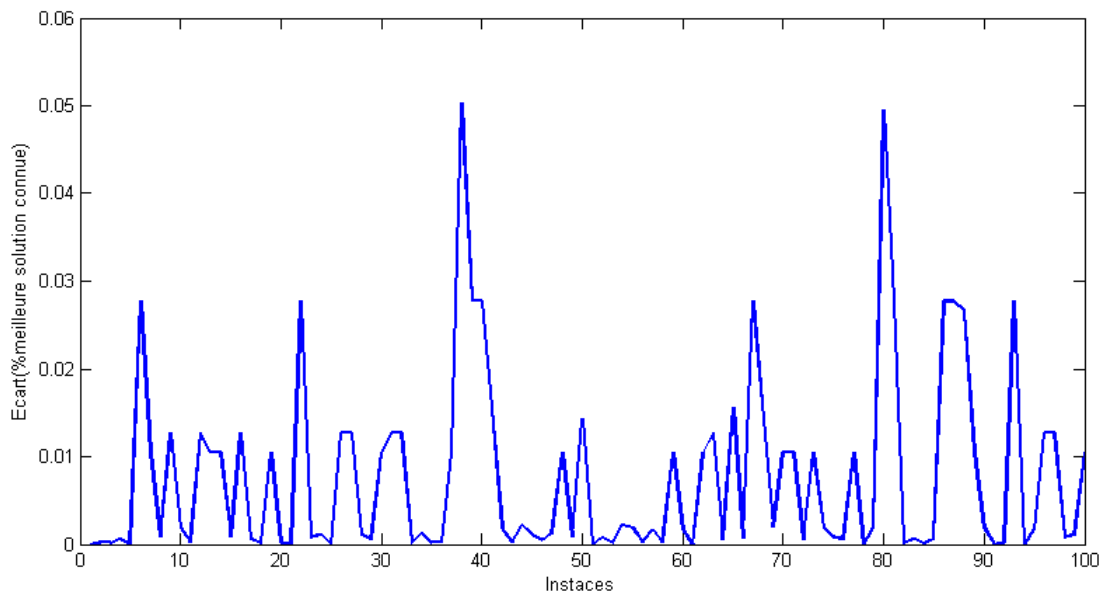


FIGURE 3.14 – L'écart entre la meilleure et la pire run de chaque instance pour AG

La figure 3.16 nous donne une idée sur la convergence de deux algorithmes sur les 500 premières itérations, l'AG flou atteint la solution optimale 45 fois sur les 100

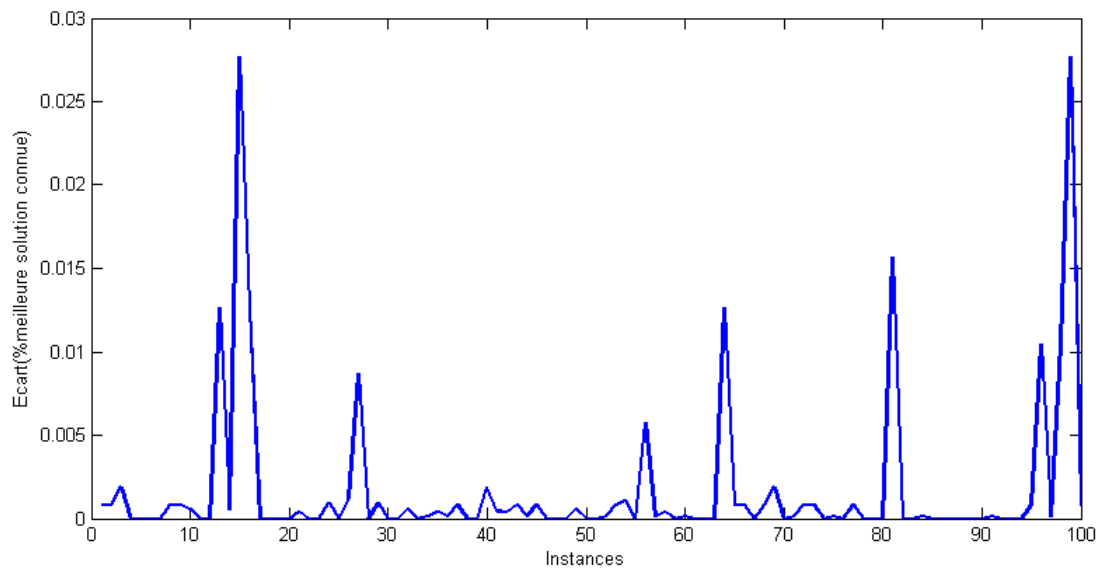


FIGURE 3.15 – L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance pour AG floue

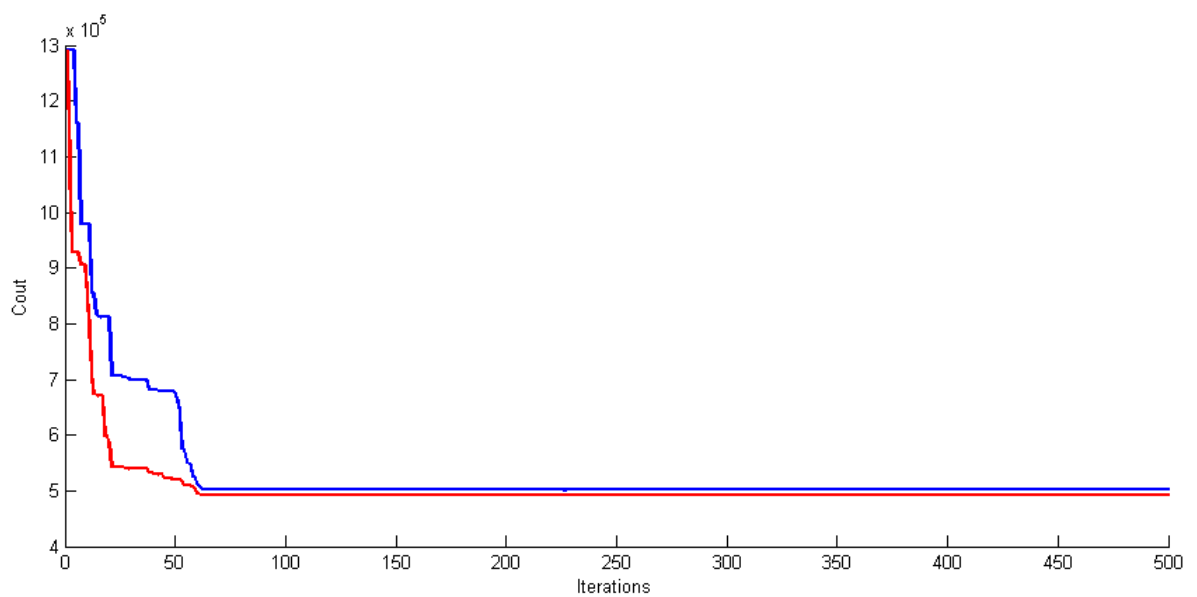


FIGURE 3.16 – Convergence de coût pour l'AG en bleue et l'AG floue en rouge

instances, sachant que l'AG l'atteint que 23 fois, en plus on remarque qu'il converge plus rapidement dès les premières itérations

3.2. Résultats expérimentaux

Une observation intéressante est que les résultats obtenus sont stables. En fait, l'erreur moyenne par rapport à la meilleure solution est de 0.76% pour l'algorithme

génétique et elle est de 0.17% pour l'algorithme génétique hybridé avec le floue. Si les runs extrêmes ne sont pas considérés, c'est-à-dire 10% des runs ne sont pas considérés (les meilleurs 5% et les pires 5%), alors ces pourcentages diminuent à 0.26% pour le génétique et 0.07% pour l'hybride. Si l'on examine l'écart entre les meilleurs et les pires runs pour chaque instance, cet écart est 5.12% 3.14 pour l'algorithme génétique et de 2.79% 3.15 pour le deuxième algorithme. En outre, l'écart de l'algorithme génétique hybridé avec le floue est toujours inférieur à celui de l'algorithme génétique. Par contre le temps de calcul pour le premier algorithme est de 5984,25s et le deuxième est de 9726,15s.

4. Algorithme PSO hybridé avec le floue

Le paramètre c_1 où le facteur cognitive du déplacement représente une grande importance pour la particule en prenant en compte ses positions antérieures. Le paramètre c_2 où facteur social représente une grande importance pour la particule pour offrir une meilleure position globale. Il est suggéré de changer dynamiquement ces deux paramètres lors de l'exécution de cet algorithme pour avoir de meilleurs résultats. La performance de l'algorithme PSO qu'il mesure l'erreur à un moment donné dans l'exécution de l'algorithme, le nombre de fois où la meilleure solution est la même "a", (les itérations eux-mêmes), sont nécessaires pour exécuter l'algorithme. Dans notre travail, tout ce qui précède est pris en considération avec le système flou pour modifier les paramètres c_1 et c_2 , ces deux paramètres changent dynamiquement à chaque génération de l'algorithme, l'algorithme est illustré à la figure 3.17.

La mesure d'erreur est défini par 3.10, qui mesure la différence entre l'essaim et sa meilleure particule.

$$e = Fitness(x_{id}) - Fitness(best_d) \tag{3.10}$$

La conception des variables d'entrée est montré sur les figure 3.18, 3.19 ce qui correspond à l'erreur d'entrée est devisé sur 5 fonctions d'appartenance, et le nombre d'itérations avec la même solution "a" est devisé trois fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenance correspondant à chaque ensemble flou sont les suivantes :

Après avoir défini les variables d'entrée possibles, il est nécessaire de créer un système flous pour l'ajustement dynamique de c_1 et c_2 . Pour les variables de sortie, les valeurs utilisées pour c_1 et c_2 sont entre 1 et 5, de tel sorte que ces variables ont été conçus en respectant cette gamme de valeurs. Chaque sortie est granulée en cinq fonctions d'appartenance, la conception des variables de sortie peut être vu sur la figure 3.20,3.21 respectivement c_1 et c_2 .

Les différentes règles floues utilisées dans notre système sont résumées dans le tableau 3.22.

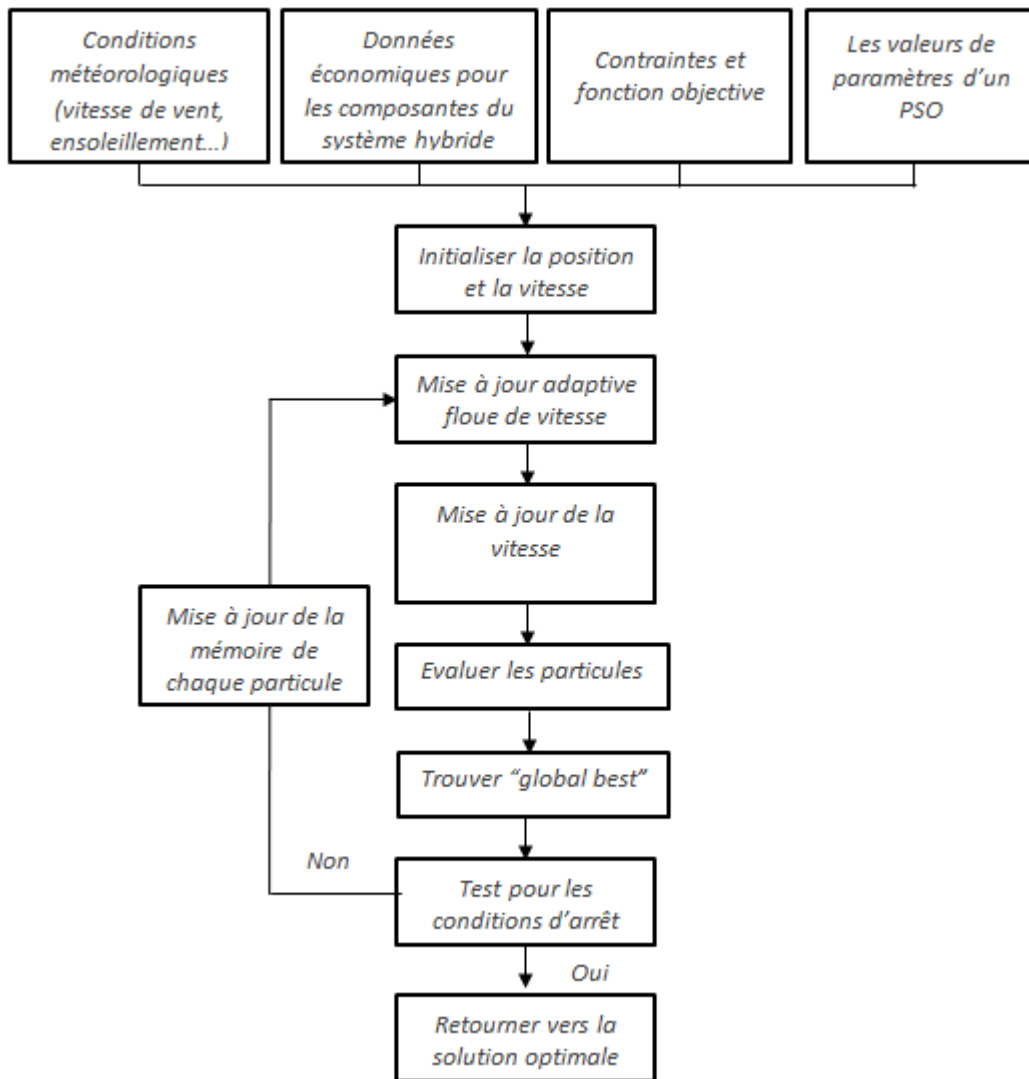


FIGURE 3.17 – Diagramme d'un PSO développé

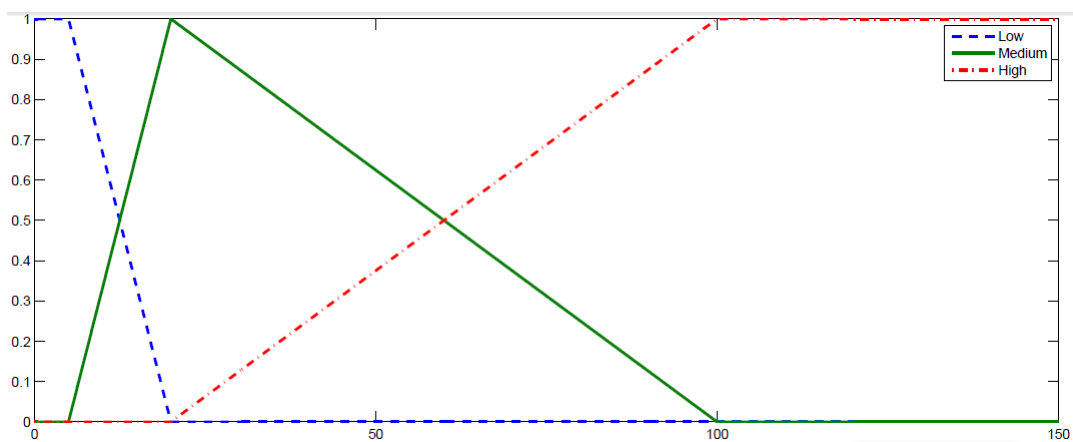


FIGURE 3.18 – Fonctions d'appartenance de l'Entrée 1 : "a"

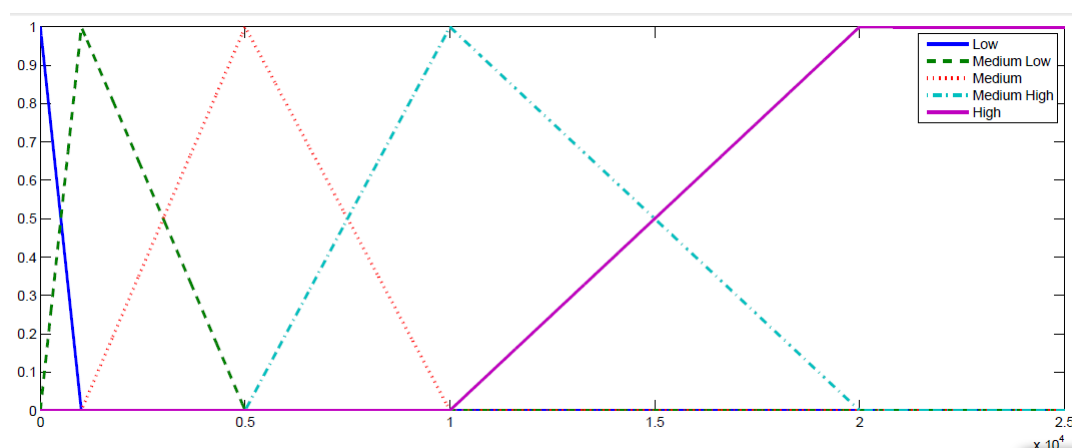
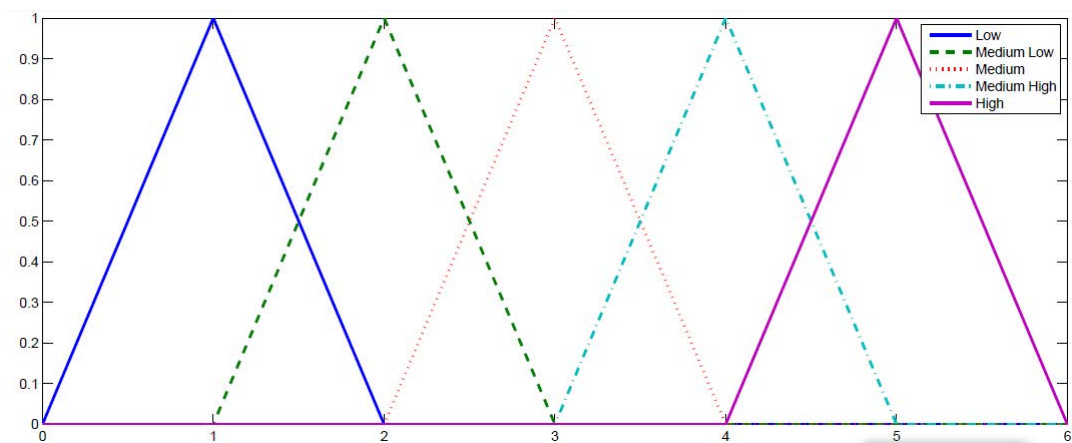


FIGURE 3.19 – Fonctions d'appartenance de l'Entrée 2 : Erreur "e"

FIGURE 3.20 – Fonctions d'appartenance de Sortie 1 : coefficient d'accélération "c₁"

5. Résultats

5.1. Conditions expérimentales

Après plusieurs tests préliminaires, les valeurs suivantes ont été choisies empiriquement comme paramètres de notre algorithme PSO : La taille de la population N est égale à 100. le facteur cognitive $c_1 = 2$ et le facteur social $c_2 = 2$ et $\omega = 0.5$ pour le PSO standard, et pour le PSO flou, les deux premiers facteurs sont des variables encadré entre 0 et 6.

Le nombre de générations (le test arrêt) est égal à 1000. Considérant le caractère stochastique de l'algorithme PSO, 100 lancements indépendants ont été effectués pour chaque instance. La meilleure solution connue pour chaque test correspond à la solution optimale donnée par l'hybridation avec le flou.

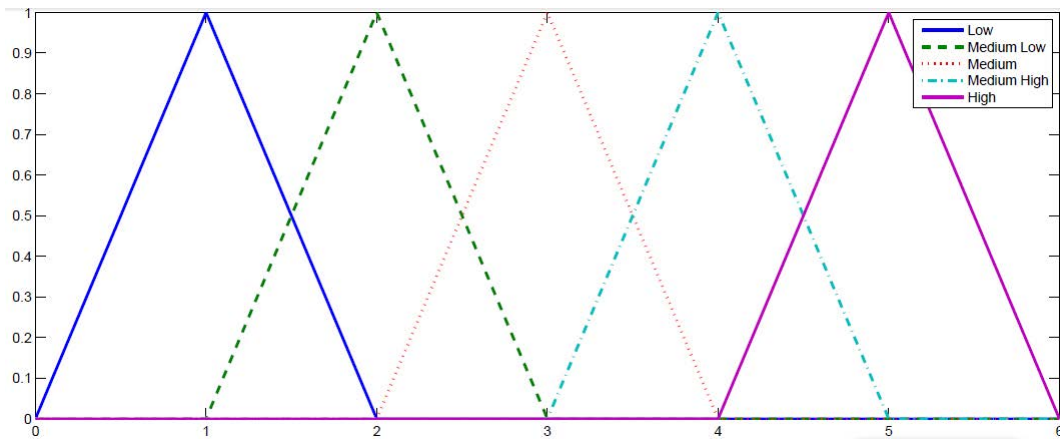


FIGURE 3.21 – Fonction d'appartenance de Sortie 2 : coefficient d'accélération "c₂"

si a est petit et e est petit, c_1 est petit et c_2 est petit
 si a est petit et e est petit moyen, c_1 est petit et c_2 est petit moyen
 si a est petit et e est moyen, c_1 est grand moyen et c_2 est moyen
 si a est petit et e est grand moyen, c_1 est petit et c_2 est grand moyen
 si a est petit et e est grand, c_1 est petit moyen et c_2 est grand

si a est moyen et e est petit, c_1 est petit moyen et c_2 est petit
 si a est moyen et e est petit moyen, c_1 est petit moyen et c_2 est moyen
 si a est moyen et e est moyen, c_1 est grand moyen et c_2 est petit
 si a est moyen et e est grand moyen, c_1 est petit et c_2 est moyen
 si a est moyen et e est grand, c_1 est moyen et c_2 est grand moyen

si a est grand et e est petit, c_1 est moyen et c_2 est petit
 si a est grand et e est petit moyen, c_1 est petit moyen et c_2 est petit moyen
 si a est grand et e est moyen, c_1 est petit et c_2 est petit
 si a est grand et e est grand moyen, c_1 est moyen et c_2 est grand
 si a est grand et e est grand, c_1 est grand et c_2 est petit moyen

FIGURE 3.22 – Rules of Fuzzy System of PSO

5.2. Résultats expérimentaux de l'algorithme génétique

Les résultats obtenus sont stables. En fait, l'erreur moyenne par rapport à la meilleure solution est de 0.51% pour le PSO et elle est de 0.14% pour le PSO hybridé avec le flou. Si les runs extrêmes ne sont pas considérés, c'est-à-dire 10% des runs ne sont pas considérés (les meilleurs 5% et les pires 5%), alors ces pourcentages diminuent à 0.19% pour le génétique et 0.03% pour l'hybride. Si l'on examine l'écart entre les meilleurs et les pires runs pour chaque instance, cet écart est 4.81% 3.23 pour l'algorithme génétique et de 2.92% 3.24 pour le deuxième algorithme. Le temps de calcul pour le PSO est de 4852,37s et le PSO flou est de 7563,68s. La meilleure

solution était trouvée 74 fois sur les 100 instances pour le PSO et 82 fois pour le PSO flou.

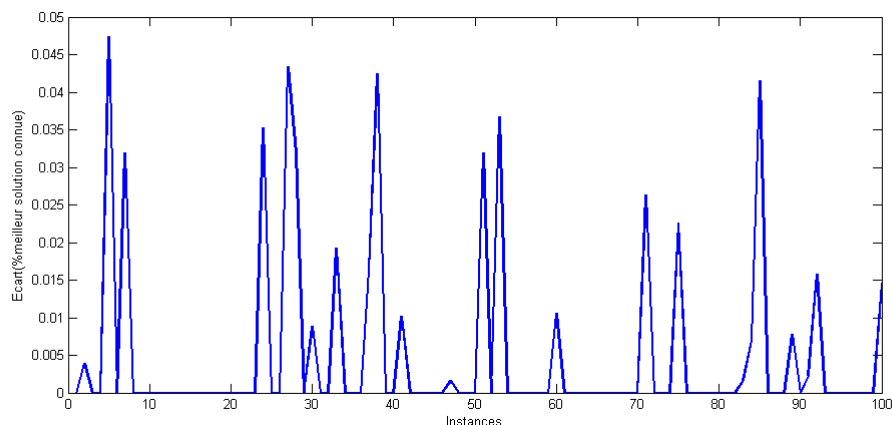


FIGURE 3.23 – L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance de PSO

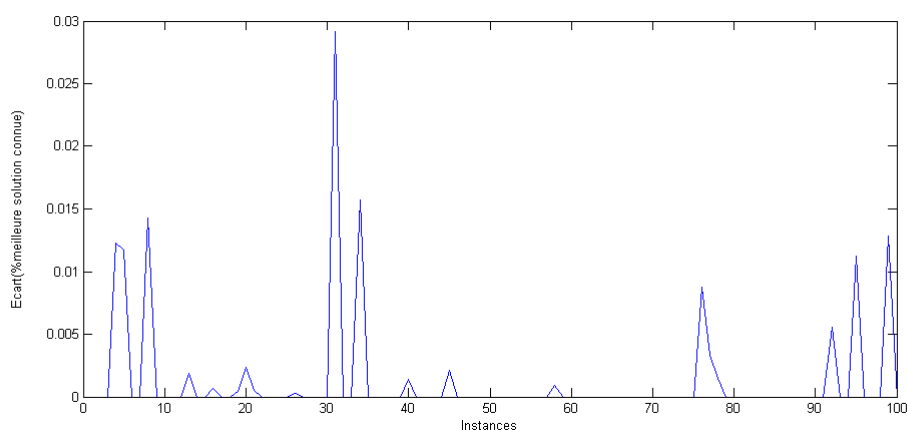


FIGURE 3.24 – L'écart entre la meilleure et le pire run de chaque instance de PSO flou

La figure 3.25 nous montre que l'algorithme hybride converge plus rapidement que l'algorithme standard sur les 200 premières itérations. D'où l'efficacité de notre contrôleur flou.

V. Conclusion

Ce chapitre présente une modification sur l'utilisation de la logique floue hybridé avec des algorithmes méta-heuristiques (algorithme génétique et optimisation par essaims particuliers) pour essayer de résoudre ce problème et d'obtenir de meilleurs résultats. Dans les algorithmes génétiques et PSO hybridé avec le flous certaines valeurs des paramètres sont modifiés dynamiquement en cours de l'évolution d'une solution de problème. Dans ce travail, l'algorithme génétique change le croisement et la mutation

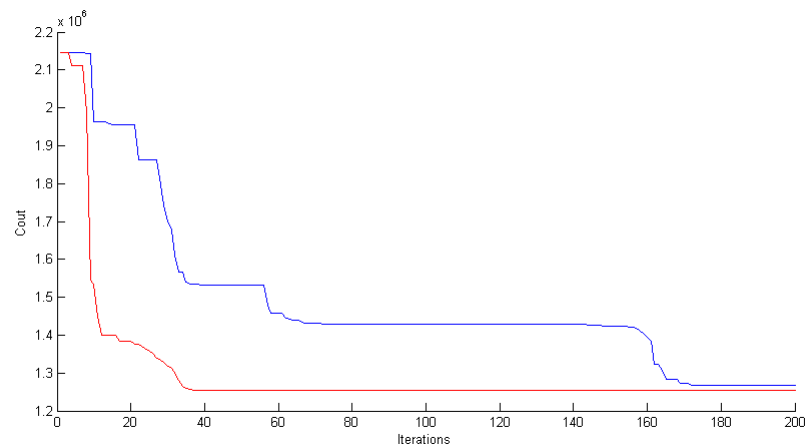


FIGURE 3.25 – Convergence de coût pour le PSO en bleue et le PSO floue en rouge

et l'algorithme de PSO change, c_1 le facteur cognitif et c_2 le facteur social, pour assurer la diversité génétique et éviter la convergence prématurée. Ces algorithmes hybridés ont été testés sur un grand nombre d'instances. L'effet de contrôleur flou sur les performances de l'algorithme génétique et de PSO en terme de qualité de solution, et de temps de calcul a aussi été étudié. Les résultats numériques montrent l'efficacité de nos algorithmes.

Conclusion et perspectives

Dans le contexte mondial et pour réduire l'émission de gaz à effet de serre et l'échauffement de la planète, le besoin de l'énergie renouvelable est indispensable. La production de l'énergie renouvelable, surtout éolienne et photovoltaïque, est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du site isolé grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de l'électronique de puissance.

Notre étude s'est focalisée sur l'électrification d'un site autonome, secteur dans lequel la rentabilité est loin d'être acquise et qui nécessite donc un degré d'optimisation de l'efficacité énergétique. Celui-ci impose une étude détaillée de potentiel solaire et éolien dans la région souhaitée pour diminuer le coût d'installation du système. Dans ce contexte, nous avons préféré à une gestion optimale de dimensionnement pour assurer non seulement la demande du consommateur mais aussi prendre en compte la durée de vie des composants.

Dans un site isolé, le besoin de continuité du service en présence de la disponibilité intermittente des sources renouvelables entraîne l'utilisation indispensable d'un système de stockage. Dans ce contexte, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée grâce au bon rapport prix/qualité. Pourtant, la mauvaise utilisation de la batterie peut entraîner sa défaillance, cela implique le besoin d'entretenir et remplacer souvent celle-ci. Le coût d'installation et de fonctionnement du système est donc augmenté. Alors, il faut non seulement avoir un schéma d'exploitation flexible des sources, mais aussi prendre en compte la durée de vie des composants, surtout de la batterie.

Les résultats obtenus tout au long de cette thèse nous permettent de dégager plusieurs perspectives. D'abord, nous pouvons étendre le modèle proposé pour augmenter la durée de vie des batteries en nombre des charges/décharges.

Ensuite, dans le chapitre 3, nous avons proposé un algorithme génétique et un PSO. Ces deux algorithmes sont très bien adaptés au traitement d'un problème de dimensionnement mono-objectif. Le choix un algorithme multiobjectif pour résoudre le problème d'un site lié au réseau avec possibilité d'acheter de l'électricité et de vendre où de stocker le surplus, avec deux objectifs : diminuer le coût total et réduire le dégagement des gaz à effet de serre peut être une autre perspective intéressante. Cette idée, qui nous paraît intéressante, a un avantage qu'elle permettrait aux utilisateurs liés au réseau de vérifier le rapport économique ainsi que l'influence de pollution.

A court terme notre défi sera d'exploiter ces perspectives et de développer les algorithmes d'optimisation multi-objectifs pour un site lié au réseau. A moyen terme, nous intéresserons à l'implémentation du système pour valider ces travaux. La plate-forme expérimentale est en cours d'élaboration.

Bibliographie

- [Abdelli, 2007] Abdelli, A. (2007). Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive.
- [Abo-Khalil et al., 2004] Abo-Khalil, A., Lee, D., and Seok, J. (2004). Variable speed wind power generation system based on fuzzy logic control for maximum output power tracking. In *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, volume 3, pages 2039–2043. IEEE.
- [Ackermann, 2006] Ackermann, T. (2006). Wind power in power systems. *Wind Engineering*, 30(5) :447–449.
- [Al-Shammaa and Addoweesh, 2012] Al-Shammaa, A. A. and Addoweesh, K. E. (2012). Optimum sizing of hybrid pv/wind/battery/diesel system considering wind turbine parameters using genetic algorithm. pages 121–126.
- [Angstrom, 1924] Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210) :121–126.
- [Arabali et al., 2013] Arabali, A., Ghofrani, M., Etezadi-Amoli, M., Fadali, M., and Baghzouz, Y. (2013). Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 28(1) :162–170.
- [Badescu, 1998] Badescu, V. (1998). Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance. *Solar Energy*, 61(4) :251–264.
- [Baring-Gould et al., 2003] Baring-Gould, E. I., Flowers, L., Lundsager, P., Mott, L., Shirazi, M., and Zimmerman, J. (2003). Worldwide status of wind/diesel applications. In *Proceedings of the 2003 AWEA Conference, Austin, TX*, number 0.2, pages 0–4.
- [Batch, 1994] Batch, T. (1994). Selective pressure in evolutionary algorithms. *IEEE press*, 1 :57–62.
- [Belakehal et al., 2009] Belakehal, S., Benalla, H., and Bentounsi, A. (2009). Power maximization control of small wind system using permanent magnet synchronous generator. *Revue des Energies Renouvelables*, 12(2) :307–319.
- [Benoît et al., 2012] Benoît, R., Arnaud, D., Bruno, F., Antoine, H., and Jonathan, S. (2012). *Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables (Coll. Sciences et technologies de l'énergie électrique)*. Lavoisier.
- [Bopp et al., 1998] Bopp, G., Gabler, H., Preiser, K., Sauer, D., and Schmidt, H. (1998). Energy storage in photovoltaic stand-alone energy supply systems. *Progress In Photovoltaics : Research and Applications*, 6(4) :271–291.

- [Borowy and Salameh, 1996] Borowy, B. S. and Salameh, Z. M. (1996). Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and pv array in a wind/pv hybrid system. *Energy conversion, ieee transactions on*, 11(2) :367–375.
- [Campbell, 1981] Campbell, G. (1981). Fundamentals of radiation and temperature relations. *Physiological plant ecology I*, pages 11–40.
- [Castro and Camargo, 2004] Castro, P. A. and Camargo, H. A. (2004). Learning and optimization of fuzzy rule base by means of self-adaptive genetic algorithm. In *Fuzzy Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1037–1042. IEEE.
- [Chang et al., 2003] Chang, T.-J., Wu, Y.-T., Hsu, H.-Y., Chu, C.-R., and Liao, C.-M. (2003). Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in taiwan. *Renewable energy*, 28(6) :851–871.
- [Cooper, 1969] Cooper, P. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3) :333–346.
- [Darwin, 1876] Darwin, C. (1876). *L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature*. C. Reinwald.
- [DeVore and Temlyakov, 1996] DeVore, R. A. and Temlyakov, V. N. (1996). Some remarks on greedy algorithms. *Advances in computational Mathematics*, 5(1) :173–187.
- [Dubayah and Loechel, 1997] Dubayah, R. and Loechel, S. (1997). Modeling topographic solar radiation using goes data. *Journal of Applied Meteorology*, 36(2) :141–154.
- [Dufo-Lopez and Bernal-Agustín, 2005] Dufo-Lopez, R. and Bernal-Agustín, J. L. (2005). Design and control strategies of pv-diesel systems using genetic algorithms. *Solar energy*, 79(1) :33–46.
- [Ekanayake et al., 2003] Ekanayake, J., Holdsworth, L., and Jenkins, N. (2003). Control of dfig wind turbines. *Power Engineer*, 17 :28.
- [El Dor, 2012] El Dor, A. (2012). Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essai particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique.
- [Eriksen et al., 2005] Eriksen, P., Ackermann, T., Abildgaard, H., Smith, P., Winter, W., and Rodriguez Garcia, J. (2005). System operation with high wind penetration. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 3(6) :65–74.
- [Ertekin and Evrendilek, 2007] Ertekin, C. and Evrendilek, F. (2007). Spatio-temporal modeling of global solar radiation dynamics as a function of sunshine duration for turkey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(1) :36–47.
- [Esrām and Chapman, 2007] Esrām, T. and Chapman, P. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *Energy conversion, IEEE transactions on*, 22(2) :439–449.
- [Faure, 2003] Faure, F. (2003). Suspension magnetique pour volant d'inertie.
- [Fernandez et al., 2008] Fernandez, L., Garcia, C., and Jurado, F. (2008). Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (dfig) wind turbines operating with power regulation. *Energy*, 33(9) :1438–1452.

- [Garcia et al., 1998] Garcia, A., Torres, J., Prieto, E., and De Francisco, A. (1998). Fitting wind speed distributions : a case study. *Solar Energy*, 62(2) :139–144.
- [Gates, 1980] Gates, D. (1980). Biophysical ecology springer-verlag. *New York*, page 611.
- [Gaztanaga, 2006] Gaztanaga, H. (2006). *Etude de structures d'integration des systemes de génération décentralisée : Application aux micro-réseaux*. PhD thesis, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble LEG (now G2ELab), Grenoble, France.
- [Gergaud, 2002] Gergaud, O. (2002). *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [Golberg, 1989] Golberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, 1989.
- [Ha, 2007] Ha, D. L. (2007). Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation.
- [Hameed et al., 2012] Hameed, A., Elhagri, M. T., Shaltout, A. A., and Aziz, M. M. A. (2012). Optimum sizing of hybrid wt/pv systems via open-space particle swarm optimization. In *Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG), 2012 Second Iranian Conference on*, pages 55–60. IEEE.
- [Hau, 2006] Hau, E. (2006). *Wind turbines : fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Verlag.
- [Hewson and Wade, 1977] Hewson, E. and Wade, J. (1977). Biological wind prospecting-. In *Third Wind Energy Workshop Proceedings, Washington, DC*, pages 335–348.
- [Hofierka and Suri, 2002] Hofierka, J. and Suri, M. (2002). The solar radiation model for open source gis : implementation and applications. In *Manuscript submitted to the International GRASS users conference in Trento, Italy*.
- [Hohm and Ropp, 2003] Hohm, D. and Ropp, M. (2003). Comparative study of maximum power point tracking algorithms. *Progress in photovoltaics : Research and Applications*, 11(1) :47–62.
- [Holland, 1975] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- [Hong and Lee, 2010] Hong, M. and Lee, H. (2010). Adaptive maximum power point tracking algorithm for variable speed wind power systems. *Life System Modeling and Intelligent Computing*, pages 380–388.
- [Hughes, 2006] Hughes, A. (2006). *Electric motors and drives : fundamentals, types, and applications*. Newnes.
- [Huynh et al., 2011] Huynh, Q., Nollet, F., Essounbouli, N., and Hamzaoui, A. (2011). Power management of a variable speed wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic. In *Fuzzy Systems (FUZZ), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1404–1410. IEEE.

- [Ibrahim, 2003] Ibrahim, A. (2003). *Fuzzy logic for embedded systems applications*. Newnes.
- [Ibrahim et al., 2008] Ibrahim, H., Ilinca, A., and Perron, J. (2008). Energy storage systems characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5) :1221–1250.
- [Jantzen, 2013] Jantzen, J. (2013). *Foundations of fuzzy control : a practical approach*. John Wiley & Sons.
- [Jin et al., 2005] Jin, Z., Yezheng, W., and Gang, Y. (2005). General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in china. *Energy Conversion and Management*, 46(2) :257–268.
- [Justus et al., 1978] Justus, C., Hargraves, W., Mikhail, A., and Graber, D. (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal of applied meteorology*, 17(3) :350–353.
- [Justus et al., 1976] Justus, C., Hargraves, W., and Yalcin, A. (1976). Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators. *Journal of applied meteorology*, 15(7) :673–678.
- [Kaabeche et al., 2006] Kaabeche, A., Belhamel, M., Ibtouen, R., Moussa, S., and Benhaddadi, M. (2006). Optimisation dun système hybride (éolien–photovoltaïque) totalement autonome. *Revue des énergies renouvelables*, 9(3) :199–209.
- [Kalantar and Mousavi, 2010] Kalantar, M. and Mousavi, G. (2010). Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage. *Applied Energy*, 87(10) :3051–3064.
- [Kasten and Czeplak, 1980] Kasten, F. and Czeplak, G. (1980). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar energy*, 24(2) :177–189.
- [Kennedy et al., 1995] Kennedy, J., Eberhart, R., et al. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. Perth, Australia.
- [Kreith and Kreider, 1978] Kreith, F. and Kreider, J. (1978). Principles of solar engineering.
- [Liu and Jordan, 1960] Liu, B. and Jordan, R. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3) :1–19.
- [Luque and Hegedus, 2010] Luque, A. and Hegedus, S. (2010). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley.
- [M. Dali and Roboam, 2008] M. Dali, J. B. and Roboam, X. (2008). Design of a stand-alone hybrid photovoltaic-wind generating system. *Journal of Electrical Systems*.
- [Mamdani and Assilian, 1975] Mamdani, E. and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1) :1–13.
- [Masters, 2013] Masters, G. M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons.

- [Menges et al., 2006] Menges, H. O., Ertekin, C., and Sonmete, M. H. (2006). Evaluation of global solar radiation models for konya, turkey. *Energy Conversion and Management*, 47(18) :3149–3173.
- [Michalewicz, 1996] Michalewicz, Z. (1996). *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. Springer Science & Business Media.
- [Minh et al., 2013] Minh, H. Q. et al. (2013). *Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour un site isolé*. PhD thesis, Reims.
- [Mittal et al., 2009] Mittal, R., Sandu, K., and Jain, D. (2009). Isolated operation of variable speed driven pmsg for wind energy conversion system. *International Journal of Engineering and Technology*, 1 :269–273.
- [Monin and Obukhov, 1954] Monin, A. and Obukhov, A. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 151 :163–187.
- [Moumami et al., 2006] Moumami, A., Hamani, N., Moumami, N., and Mokhtari, Z. (2006). Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de biskra. *Une*, 3 :4.
- [MRaoui et al., 2011] MRaoui, A., Mouhous, S., Malek, A., and Benyoucef, B. (2011). Etude statistique du rayonnement solaire à alger. *Revue des Energies Renouvelables*, 14(4) :637–648.
- [Muzathik et al., 2011] Muzathik, A., Nik, W., Ibrahim, M., Samo, K., Sopian, K., and Alghoul, M. (2011). Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 6(1) :75–80.
- [Nelson et al., 2002] Nelson, V., Foster, R., Clark, N., and Raubenheimer, D. (2002). Wind hybrid systems technology characterization. *West Texas AM University–AEI, New Mexico State University–SWTDI, USDA–ARS Bushland, Vista University*.
- [Nema et al., 2009] Nema, P., Nema, R., and Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and pv-solar : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8) :2096–2103.
- [Nguyen and Pryor, 1997] Nguyen, B. T. and Pryor, T. L. (1997). The relationship between global solar radiation and sunshine duration in vietnam. *Renewable Energy*, 11(1) :47–60.
- [Oates et al., 2003] Oates, P., Shanahan, P., and Polz, M. (2003). Solar disinfection (sodis) : simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in haiti. *Water Research*, 37(1) :47–54.
- [Observ, 2014] Observ, E. (2014). La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. *Collection chiffres et statistiques. Neuvième inventaire-Edition*.
- [Oke, 1988] Oke, T. (1988). *Boundary layer climates*. Psychology Press.
- [Paish, 2002] Paish, O. (2002). Small hydro power : technology and current status. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(6) :537–556.
- [Pallabazzer, 1995] Pallabazzer, R. (1995). Evaluation of wind-generator potentiality. *Solar Energy*, 55(1) :49–59.

- [Pastor, 2006] Pastor, M. A. C. (2006). *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*. PhD thesis.
- [Philippopoulos et al., 2012] Philippopoulos, K., Deligiorgi, D., and Karvounis, G. (2012). Wind speed distribution modeling in the greater area of chania, greece. *International Journal of Green Energy*, 9(2) :174–193.
- [Pundaleek B. H. and G., 2010] Pundaleek B. H., M. G. R. and G., V. K. M. (2010). Speed control of induction motor : Fuzzy logic controller v/s pi controller. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 10(10).
- [Quaschnig, 2005] Quaschnig, V. (2005). *Understanding renewable energy systems*, volume 2. Earthscan.
- [Rocha et al., 2012] Rocha, P. A. C., de Sousa, R. C., de Andrade, C. F., and da Silva, M. E. V. (2012). Comparison of seven numerical methods for determining weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of brazil. *Applied Energy*, 89(1) :395–400.
- [Salhi et al., 2010] Salhi, I., Doubabi, S., Essounbouli, N., and Hamzaoui, A. (2010). Application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hydro-electrical power plant. *Renewable Energy*, 35(9) :2071–2079.
- [Seguro and Lambert, 2000] Seguro, J. and Lambert, T. (2000). Modern estimation of the parameters of the weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1) :75–84.
- [Stevens and Smulders, 1979] Stevens, M. and Smulders, P. (1979). The estimation of the parameters of the weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes. *Wind engineering*, 3 :132–145.
- [Stiebler, 2008] Stiebler, M. (2008). *Wind energy systems for electric power generation*. Springer Verlag.
- [Tsili and Papathanassiou, 2009] Tsili, M. and Papathanassiou, S. (2009). A review of grid code technical requirements for wind farms. *Renewable power generation, IET*, 3(3) :308–332.
- [van den Berg et al., 2002] van den Berg, J., Kaymak, U., and Van den Bergh, W.-M. (2002). Fuzzy classification using probability-based rule weighting. 2 :991–996.
- [Vechiu, 2005] Vechiu, I. (2005). *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome*. PhD thesis.
- [Wang and Chang, 2004] Wang, Q. and Chang, L. (2004). An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 19(5) :1242–1249.
- [Weibull, 1951] Weibull, W. (1951). Wide applicability. *Journal of applied mechanics*.
- [Wichert, 1997] Wichert, B. (1997). Pv-diesel hybrid energy systems for remote area power generationa review of current practice and future developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(3) :209–228.
- [Wurtz, 1996] Wurtz, F. (1996). Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques.
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3) :338–353.

RESUME:

Cette thèse propose la méthodologie de dimensionnement pour optimiser la configuration de système d'énergie hybride qui se compose de deux sources: panneaux photovoltaïques et éoliennes. Pour cela, nous utilisons une approche pour la génération de base des règles floues et une optimisation automatique au moyen d'algorithme génétique et d'un PSO adaptés avec le flou. Ces algorithmes nous permettent d'obtenir la meilleure solution possible de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et des batteries, minimisant le coût total du système et garantissant la disponibilité permanente de l'électricité pour couvrir les besoins énergétiques. L'historique horaire de vitesse du vent ainsi que sa direction, d'ensoleillement, sont utilisés pour modéliser la production des éoliennes, la production photovoltaïque et l'état de charge des batteries. Le coût total est la fonction objective et la taille technique est une contrainte.

Mots-clés: Système hybride, énergie renouvelable, dimensionnement, optimisation, logique floue, méta-heuristique, supervision.

Abstract:

This thesis proposes the optimum sizing methodology to optimize the configuration of hybrid energy system. For this, we use an approach for automatic fuzzy rule base generation and optimization by means of Fuzzy-Adaptive Genetic Algorithm and fuzzy adaptive PSO. This Algorithms allows us to obtain the optimal number of photovoltaic panels, wind turbines and storages units, ensuring the minimal global high efficiency system total cost and guaranteeing the permanent availability of energy to cover the load energy requirements. Historical hourly wind speed, solar irradiance and load data are used to stochastically model the wind turbines, photovoltaic generation and load. The total cost is the objective function and the technical size is a constraint.

Key words :Hybrid system, fuzzy logic, meta heuristics, sizing, supervision, renewable energy.

Discipline : Automatique, Signal, Productique, Robotique (spécialité Automatique)

Le Centre de Recherche en STIC de l'URCA, EA 3804 UFR Sciences, Campus Moulin de la Housse 51100 REIMS - FRANCE