

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف 1

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

## **THESE**

Présentée au Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

## **DOCTORAT**

**Filière** : Electrotechnique

**Spécialité** : Electrotechnique

Par

**Melle. SAIB Samia**

## **THEME**

# **Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique**

*Soutenue le : 25 /10/2018 devant un Jury composé de :*

Pr. BOUKTIR Tarek	Professeur à l'Université Ferhat ABBAS Sétif 1	Président
Pr. GHERBI Ahmed	Professeur à l'Université Ferhat ABBAS Sétif 1	Directeur de thèse
Dr. KAABECHE Abdelhamid	M.R.A au CDER Alger	Co-Directeur de thèse
Dr. BOUZIDI Athmane	M.C.A à l'Université A. MIRA de Bejaia	Examineur
Dr. SAYAH Samir	M.C.A à l'Université Ferhat ABBAS Sétif 1	Examineur

## ***Dédicaces***

---

*Je dédie ce travail:*

*-A mes très chers parents qui, m'ont aidé tout au long de cette carrière d'étude et pour lesquels j'exprime toute ma tendresse et amour et nchallah le dieu les protègent.*

*-A la, mémoire de ma grande mère : Fatima, qu'Allah, le Tout Puissant, ait pitié de son âme*

*-A mes frères et sœurs*

*-A mes très chers : Kouther Maria, Tasnime Fatima Elzahraa et Mohammed Abed el Rahim.*

*« Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs, n'a jamais tenté d'innover »*

*« Je crois en une vie après la mort, tout simplement parce que l'énergie ne peut pas mourir ;  
Elle circule, se transforme et ne s'arrête jamais »*

*« La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information »*

***Albert Einstein***

***Soumia***

### ملخص:

العمل المنجز في هذه الأطروحة يقدم دراسة لتحسين نظام الطاقة الهجين المتكون من نظام كهروضوئية، توربينات الرياح ونظام تخزين الطاقة مع الأخذ بعين الاعتبار الربط بالشبكة الكهربائية. وقد تم اقتراح تحليل تقني اقتصادي في هذه الدراسة التي تهدف إلى حل مشكلة التحسين وإيجاد الحل الأمثل فيما يتعلق بتكلفة وتحجيم النظام الهجين، مع مراعاة التقلبات في التوتر. في هذه الحالة، تم تطبيق استراتيجية جديدة لتسيير الطاقة بين النظام الهجين والشبكة، والتي تعتمد على عمليتين هما تخزين وبيع الطاقة. استخدمت طريقة الميناهوريستيك المسماة سرب الجسيمات الأمثل (PSO) ومقارنتها مع طرق أخرى مطورة ومحسنة على أساس PSO، والتي كان الهدف منها إيجاد حل أفضل لمشكلة التحسين. كما تم استخدام نظام البطارية لتخزين الطاقة الذي بين إيجابياته في هذه الدراسة خاصة في تخزين الطاقة، تخفيض من تذبذب في التوتر وأيضا تسيير الطاقة. نتائج المحاكاة عن طريق برنامج الماتلاب بينت فعالية وكفاءة طريقة FC-VACPSO وأنها تتقارب بسرعة أكبر وأعطت أفضل تكلفة ربح للنظام المدروس مقارنة مع الطرق الأخرى.

**كلمات مفتاحية:** نظام الطاقة الهجين، نظام تخزين الطاقة، تحسين تقني-اقتصادي، تذبذب في التوتر، تحسن سرب الجسيمات الأمثل.

## **Abstract**

The work achieved in this thesis presents an optimization study of a hybrid energy system constituting a photovoltaic panel, a wind turbine and a storage energy system connected to the electrical network. A techno-economic analysis was proposed in this study with the aim to solve the optimization problem and find an optimal solution concerning the cost and the sizing of the hybrid system with a considering the voltage fluctuation.

In this case, a new energy management strategy has been applied between the hybrid system and the grid, which depends on two strategy processes and are identified by the storage and buying energy. A metaheuristic method named particle swarm optimization (PSO) was used and compared to other improved and developed methods based PSO, in order to found a better solution regarding to the optimization problem. The use of the BESS in this work demonstrates its advantages as storage energy, reducing voltage perturbation and managing the energy management.

The simulation results, obtained under MATLAB environment, show the effectiveness and efficiency of the FC-VACPSO method as it converges faster and gives a better benefit cost for the studied system than other methods.

**Key Words:** Hybrid energy system, storage energy system, techno-economic optimization, voltage perturbation, improved particle swarm optimization.

## Résumé :

Le travail réalisé dans cette thèse présente une étude d'optimisation d'un système d'énergie hybride constituant un panneau photovoltaïque, une éolienne et un système de stockage d'énergie avec connexion au réseau électrique. Une analyse techno-économique a été proposée dans cette étude dont le but est de résoudre le problème d'optimisation et trouver une solution optimale concernant le coût et le dimensionnement du système hybride, en considérant la fluctuation de tension.

Dans ce cas, une nouvelle stratégie de gestion d'énergie a été appliquée entre le système hybride et le réseau, qui dépend de deux stratégies et qui sont identifiés par le stockage et la vente d'énergie. Une méthode métaheuristique nommée optimisation essaim de particule (PSO) été utilisée et comparée à d'autres méthodes améliorées et développées à base de PSO, dans l'objectif de trouver une meilleure solution au problème d'optimisation. L'utilisation du BESS démontre son avantage dans ce travail comme le stockage d'énergie, réduire la perturbation de la tension et la gestion de l'énergie.

Les résultats de simulation obtenus par le logiciel Matlab montrent la performance et l'efficacité de la méthode de FC-VACPSO qui converge plus rapidement et donne un meilleur coût de prestation pour le système étudié par rapport aux autres méthodes.

**Mots Clés :** Système d'énergie hybride, système de stockage d'énergie, techno-économique optimisation, perturbation de tension, essaim de particule d'optimisation améliorée.

## إقرار التأليف

أصرح أنا الطالبة صايب سامية بأن البحث المقدم مني في هذه الرسالة للحصول على درجة الدكتوراه إنما هو من نتاج عملي وجهدي العلمي الخالص، وأنه لم يسبق لي التقدم به لأي جهة علمية كما لم يتم استخدام أي عمل شخص آخر بدون الإقرار الواجب في هذه الرسالة. وقد تم اقتباس جميع المراجع والمقتطفات الحرفية، وتم الاعتراف بكافة مصادر المعلومات، بما في ذلك الرسومات البيانية ومجموعات البيانات.

## Declaration of authorship

I certify that this thesis has been composed by me and is based on my own work, unless stated otherwise. No other person's work has been used without due acknowledgement in this thesis. All references and verbatim extracts have been quoted, and all sources of information, including graphs and data sets, have been specifically acknowledged.

## Déclaration d'auteur

Je, soussignée Melle SAIB Samia que cette thèse a été rédigée par moi-même et est basée sur mon propre travail, sauf indication contraire. Aucun travail d'autre personne n'a été utilisé sans reconnaissance dans cette thèse. Toutes les références et tous les extraits textuels ont été cités, et toutes les sources d'information, y compris les graphiques et les ensembles de données, ont été expressément reconnues.

## Liste des publications

---

Les algorithmes et modèles développés décrits dans cette thèse ont été décrits aussi dans les articles et publications suivantes

### Publications dans des Revues avec Comité de Lecture International

1. **SAMIA SAIB, AHMED GHERBI, ABDELHAMID KAABECHE, RAMAZAN BAYINDIR**, “Techno-Economic Optimization of a Grid-Connected Hybrid Energy System Considering Voltage Fluctuation”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol.13, No.2, pp.659-668, 2018.
2. **SAMIA SAIB, AHMED GHERBI, RAMAZAN BAYINDIR**,” Optimization Study of Hybrid Renewable Energy System in Autonomous Site”, *Lecture Notes in Networks and Systems* 35 Springer International Publishing AG, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73192-6\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73192-6_45), 2018.

### Communications dans des Congrès Internationaux avec Comité de Lecture

1. **SAIB SAMIA, GHERBI AHMED**,” Modeling and simulation of hybrid systems(PV/Wind/Battery) connected to the grid, *International Conference on Electrical Engendering and Automatic Control (ICEEAC'13)*, Sétif, Algeria, November 24 -26,2013.
2. **SAIB SAMIA, GHERBI AHMED**, “Modeling and simulation of grid connected hybrid system (Photovoltaic/battery), *2<sup>nd</sup> International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA'15)*, Djelfa, Algeria, March 29-30, 2015.
3. **SAIB SAMIA, GHERBI AHMED**, “Simulation and Control of hybrid renewable energy system connected to the grid”, *5th International youth Conference on Energy*, Pisa, Italy, May 27-30, 2015.
4. **SAIB SAMIA, GHERBI AHMED**, “A comparative study of Photovoltaic panel models of a grid connected system with batteries”, *2<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, l'Electronique , l'Automatique et la Maintenance (CIEEAM'15)*, Oran, Algérie, 24-25 Novembre, 2015.
5. **SAIB SAMIA, GHERBI AHMED AND BAYINDIR RAMAZAN**, “Optimization Study of Hybrid Renewable Energy System in Autonomous Site”, *International conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems (IC-AIRES 2017)*, Tipaza, Algeria, October 22-24, 2017.

## *Remerciements*

---

Je remercie le bon dieu, le tout puissant qui m'a aidé et ma donnée la volonté, le courage et la patience d'élaborer ce modeste travail. Merci beaucoup mon dieu.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués dans le Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS) de l'université Ferhat Abbas Setif1 (Algérie).

Je souhaite exprimer mon remerciement à mon encadreur Monsieur AHMED GHERBI, Professeur au département d'électrotechnique à l'université de Sétif 1, d'avoir accepté l'encadrement de ma thèse, je le remercie infiniment pour ses conseils, ses suivis et surtout sa disponibilité durant ma recherche. Ainsi je remercie également mon Co-encadreur Monsieur ABDELHAMID KAABECHE pour ces conseils et ces directions de cette thèse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur ABBAS RAJABI GHANAVEIH, assistant Professeur à l'université de Sharif à Téhéran, pour l'accueil chaleureux durant mon stage au sein de l'université de Sharif. Je lui exprime toute ma gratitude pour sa compétence, son expérience, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines. Je le remercie infiniment pour ces conseils, ces orientations et ces suggestions durant mon stage pour réaliser ce modeste travail. Je remercie également toute l'équipe et les personnes travaillant attaché au département d'énergie de l'université de Sharif.

Je suis également très honorée que, Monsieur TAREK BOUKTIR Professeur à l'Université de Ferhat ABBAS Sétif 1, ait accepté d'être président du jury de ma soutenance.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

- Pr. DJAMAL AOUZELLAG, Professeur à l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,
- Dr. ATHMANE BOUZIDI, Maitres de Conférences classe « A » à l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,
- Dr. SAMIR SAYAH, Maitres de Conférences classe « A » à l'université Ferhat ABBAS Sétif 1,

Finalement, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Sétif, le 27 /05 /2018

Melle SAIB SAMIA



Dédicaces.....	i
Résumé de la thèse .....	ii
Liste des publications .....	vi
Remerciements .....	vii
Sommaire .....	viii
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Listes des Acronymes et Symboles.....	xv

## *Chapitre 01*

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexte Général .....	1
1.2. Problématique.....	2
1.3. Objectifs de la thèse .....	3
1.4. Structure de la thèse .....	3

## *Chapitre 02*

<b>Systèmes hybrides d'énergies renouvelables.....</b>	<b>5</b>
2.1. Introduction .....	5
2.2. Crise énergétique mondiale .....	5
2.3. Energies renouvelables .....	7
2.3.1. Avantages des énergies renouvelables.....	7
2.3.2. Inconvénients des énergies renouvelables.....	8
2.4. Types d'énergies renouvelables.....	8
2.4.1. Énergie solaire .....	8
2.4.2. Énergie éolienne .....	16
2.4.3. Énergie hydraulique .....	24
2.4.4. Énergie de la biomasse.....	25
2.4.5. Énergie géothermique .....	25
2.4.6. Énergie marine .....	26
2.5. Production des énergies renouvelables .....	26
2.5.1. Dans le monde .....	26
2.5.2. En Algérie.....	31
2.6. Systèmes hybrides.....	38
2.6.1. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides .....	39
2.6.2. Classification des systèmes d'énergies hybrides.....	40
2.7. Configuration des systèmes des énergies hybrides.....	41
2.7.1. Architecture à bus à CC .....	41

2.7.2. Architecture mixte à bus à CC/ CA .....	42
2.7.3. Architecture à bus à CA .....	43
2.8. Principaux composants des systèmes hybrides.....	43
2.8.1. Générateur diesel .....	43
2.8.2. Systèmes de stockage.....	44
2.8.3. Convertisseurs d'électronique de puissance.....	52
2.8.4. Charge.....	53
2.9. Commande des systèmes hybrides .....	53
2.10. Conclusion.....	53

## ***Chapitre 03***

### **Modélisation et simulation des systèmes hybrides connectés au réseau..... 54**

3.1. Introduction .....	54
3.2. Modélisation des systèmes hybrides.....	54
3.2.1. Système photovoltaïque .....	54
3.2.2. Système éolien .....	63
3.2.3. Système de stockage d'énergie .....	78
3.2.4. Bus Continu .....	83
3.2.5. Onduleur .....	85
3.2.6. Contrôle du réseau électrique .....	87
3.3. Résultats de simulation .....	90
3.4. Interprétation des résultats.....	92
3.5. Conclusion.....	92

## ***Chapitre 04***

### **Méthodes d'optimisation des systèmes hybrides : Revue de Littérature ..... 93**

4.1. Introduction .....	93
4.2. Définition.....	93
4.3. Techniques d'optimisation.....	94
4.3.1. Méthodes classiques.....	94
4.3.2. Méthodes Intelligentes.....	103
4.3.3. Méthodes approchées.....	109
4.4. Logiciels d'optimisation .....	119
4.5. Conclusion.....	120

## ***Chapitre 05***

### **Optimisation d'un système hybride (PV/Eolien/Batterie) connecté au réseau ..... 121**

5.1. Introduction .....	121
5.2. Critères technico-économiques.....	121

5.2.1. Critères techniques .....	121
5.2.2. Critères économiques .....	123
5.3. Solutions techno-économiques .....	123
5.3.1. Configuration du système .....	124
5.3.2. Batteries .....	124
5.4. Stratégies de gestion d'énergie.....	124
5.4.1. Stratégies pour satisfaire la demande.....	125
5.4.2. Stratégies incluant un facteur de décision technique.....	125
5.4.3. Stratégies incluant le facteur de décision économique.....	126
5.4.4. Stratégies incluant des facteurs de décision techniques et économiques .....	127
5.5. Objectif de l'étude .....	127
5.5.1. Vue globale du système hybride connecté au réseau électrique .....	127
5.5.2. Modèle du système hybride .....	128
5.6. Opération de stratégie d'énergie.....	130
5.6.1. Stratégie du stockage .....	131
5.6.2. Stratégie de vente.....	131
5.7. Méthode d'optimisation .....	132
5.7.1. Origine de l'idée de l'optimisation par essaim des particules.....	133
5.7.2. Optimisation par essaim des particules (PSO).....	134
5.7.3. Méthode par essaim des particules à convergence rapide.....	136
5.7.4. Méthode de PSO avec Coefficients d'Accélération Variable.....	137
5.7.5. Méthode de FC _ VACPSO.....	137
5.8. Problème d'optimisation.....	138
5.9. Résultats de simulation .....	140
5.9.1. Analyse de sensibilité .....	142
5.9.2. Discussion des résultats.....	143
5.10. Conclusion.....	144

## *Chapitre 06*

<b>Conclusions Générales et Perspectives.....</b>	<b>146</b>
6.1. Contexte .....	146
6.2. Contributions.....	146
6.3. Perspectives .....	148
Annexe A- Paramètres du système d'énergie hybride.....	149
Références Bibliographiques.....	151

## Liste des figures

Figure 2.1. Différents types d'énergies renouvelables.....	7
Figure 2.2. Diversification du système photovoltaïque.....	9
Figure 2.3. Schéma d'une cellule photovoltaïque. ....	10
Figure 2.4. Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction. ....	11
Figure 2.5. Types de cellule photovoltaïque.....	12
Figure 2.6. Structure d'une cellule solaire en silicium. ....	14
Figure 2.7. Schéma d'un hacheur série.....	15
Figure 2.8. Schéma d'un hacheur parallèle. ....	16
Figure 2.9. Schéma d'un hacheur série-parallèle.....	16
Figure 2.10. Éoliennes à axe horizontal. ....	18
Figure 2.11. Orientation de la turbine d'une éolienne à axe horizontal. ....	18
Figure 2.12. Éoliennes à axe vertical.....	19
Figure 2.13. Composants d'une turbine éolienne. ....	20
Figure 2.14. Constitution d'un système éolien. ....	21
Figure 2.15. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	22
Figure 2.16. Machine asynchrone connectée directement au réseau.....	23
Figure 2.17. Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble des convertisseurs.....	24
Figure 2.18. Machine synchrone connectée au réseau à travers un convertisseur MLI en cascade. ....	24
Figure 2.19. Production mondiale des énergies renouvelables –fin 2015- [20]. ....	27
Figure 2.20. Capacités mondiales totales de l'énergie solaire photovoltaïque en 2016 [22]. ....	28
Figure 2.21. Capacités mondiales de l'énergie solaire thermodynamique en 2015-2016 [20].....	28
Figure 2.22. Capacité mondiale d'énergie éolienne en 2016 [22]. ....	29
Figure 2.23. Capacité totale de l'énergie géothermique [20]. ....	30
Figure 2.24. Capacité totale de l'énergie hydraulique [20]. ....	30
Figure 2.25. Production nationale des énergies renouvelables en TWh [25]. ....	32
Figure 2.26. Installation du parc de la production nationale en MW [25]. ....	32
Figure 2.27. Irradiation totale journalière au mois de juillet [26]. ....	33
Figure 2.28. Irradiation totale journalière au mois de Décembre [26]. ....	33
Figure 2.29. Centrale thermique solaire avec stockage [25]. ....	35
Figure 2.30. Vitesses moyennes du vent à 10 m du sol [26]. ....	36
Figure 2.31. Nappe Albiennaise dans l'Algérie [26]. ....	37
Figure 2.32. Structure générale d'un système hybride [30]. ....	40
Figure 2.33. Configuration des SEH à bus CC [2]. ....	42
Figure 2.34. Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [2]. ....	42
Figure 2.35. Configuration de bus CA. ....	43
Figure 2.36. Conception d'un générateur diesel [2]. ....	44
Figure 2.37. Schéma de principe de la batterie Li-Ion [33]. ....	48

<b>Figure 2.38.</b> Fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion.....	49
<b>Figure 2.39.</b> Diagramme de RAGONE : Comparaison des technologies Li-ion et Plomb-Acide [35].....	50
<b>Figure 3.1.</b> Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	55
<b>Figure 3.2.</b> Modèle d'un système photovoltaïque.....	61
<b>Figure 3.3.</b> Organigramme de la méthode IncCond.....	63
<b>Figure 3.4.</b> Caractéristiques $I - V, P - V$ du module photovoltaïque (à 25°C).....	63
<b>Figure 3.5.</b> Tube du courant autour d'une éolienne.....	64
<b>Figure 3.6.</b> Caractéristique du coefficient de puissance.....	65
<b>Figure 3.7.</b> Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	66
<b>Figure 3.8.</b> Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle ( $\Omega, R_t$ ).....	66
<b>Figure 3.9.</b> Coefficient de puissance ( $C_p$ ).....	67
<b>Figure 3.10.</b> Caractéristique de la puissance de sortie de la turbine (avec $\beta=0$ ).....	68
<b>Figure 3.11.</b> Caractéristiques de la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent.....	70
<b>Figure 3.12.</b> Schéma de structure de contrôle du système éolien.....	73
<b>Figure 3.13.</b> Contrôle d'MPPT appliqué au convertisseur.....	73
<b>Figure 3.14.</b> Modèle simple de la batterie.....	79
<b>Figure 3.15.</b> Block de batterie sous Matlab/Simulink.....	80
<b>Figure 3.16.</b> Circuit équivalent de la batterie.....	81
<b>Figure 3.17.</b> Courbe de décharge d'une batterie.....	81
<b>Figure 3.18.</b> Caractéristique de décharge de la batterie Li-ion.....	82
<b>Figure 3.19.</b> Hacheur réversible en courant.....	83
<b>Figure 3.20.</b> Contrôle du hacheur bidirectionnel.....	83
<b>Figure 3.21.</b> Couplage des systèmes hybrides (PV/éolien/batterie) par le bus continu.....	84
<b>Figure 3.22.</b> Modèle du bus continue.....	84
<b>Figure 3.23.</b> Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	86
<b>Figure 3.24.</b> Boucle de Contrôle de la PLL.....	88
<b>Figure 3.25.</b> Fonctionnement de la PLL [69].....	89
<b>Figure 3.26.</b> Modèle du système hybride dans l'environnement Matlab/Simulink.....	89
<b>Figure 3.27.</b> Schéma de block de la commande hystérésis [72].....	90
<b>Figure 3.28.</b> Tension de sortie du réseau électrique.....	90
<b>Figure 3.29.</b> Courant de sortie du réseau électrique.....	91
<b>Figure 3.30.</b> Synchronisation du réseau électrique.....	91
<b>Figure 3.31.</b> Puissances active et réactive du réseau électrique.....	91
<b>Figure 3.32.</b> Tension du bus continu.....	92
<b>Figure 4.1.</b> Coût total du système par optimisation du système hybride Eolien/PV/Diesel/Batterie [82].....	96
<b>Figure 4.2.</b> Relation entre $LPP_j$ et la capacité du générateur $C_{Aj}$ [87].....	97
<b>Figure 4.3.</b> Densités de probabilité réelles et approximatives (pour décembre) [85].....	98
<b>Figure 4.4.</b> Rayonnement solaire journalier et bilan énergétique cumulé durant l'hiver [89].....	99

<b>Figure 4.5.</b> Démarche d'un algorithme génétique. ....	104
<b>Figure 4.6.</b> Configuration de base du système de logique floue.....	106
<b>Figure 4.7.</b> RNA multicouches. ....	107
<b>Figure 4.8.</b> Structure du RNA.....	108
<b>Figure 4.9.</b> Techniques d'optimisation.....	110
<b>Figure 4.10.</b> Organigramme d'un algorithme évolutionnaire.....	112
<b>Figure 4.11</b> Différents types d'essaims.....	113
<b>Figure 4.12.</b> Organigramme de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules .....	114
<b>Figure 4.13.</b> Un vol Levy dans un plan en 2 dimensions.....	117
<b>Figure 4.14.</b> Organigramme de l'algorithme de l'optimisation par la recherche coucou.....	118
<b>Figure 5.1.</b> Modèle du SEH connecté au réseau.....	128
<b>Figure 5.2.</b> Trajectoire de particule. ....	132
<b>Figure 5.3.</b> Mise à jour du PSO pour la position suivante dans un plan de 2 dimensions. ....	135
<b>Figure 5.4.</b> Calcul de la dimension particulaire moyenne pour N particules [164]. ....	136
<b>Figure 5.5.</b> Organigramme de l'optimisation techno-économique.....	139
<b>Figure 5.6.</b> Profile de la vitesse du vent durant une journée.....	140
<b>Figure 5.7.</b> Profile de l'irradiation solaire durant une journée.....	140
<b>Figure 5.8.</b> L'énergie totale du système hybride durant une journée.....	141
<b>Figure 5.9.</b> Variation de la tension sans l'intégration de la batterie. ....	141
<b>Figure 5.10.</b> Variation de la tension avec l'intégration de la batterie. ....	141
<b>Figure 5.11.</b> Etat de charge de la batterie. ....	142
<b>Figure 5.12.</b> Convergence des méthodes métaheuristiques.....	142

## Liste des tableaux

---

---

<b>Tableau 2.1.</b> Classification des turbines éoliennes.....	19
<b>Tableau 2.2.</b> Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie.....	33
<b>Tableau 2.3.</b> Répartition des énergies renouvelables du 2015-2030 [26].....	38
<b>Tableau 2.4.</b> Classification des systèmes hybrides par quantité de puissance [30].....	41
<b>Tableau 4.1.</b> Configuration optimale et coût du système éolien /PV /diesel/batterie.....	96
<b>Tableau 4.2.</b> NPC pour le SEH .....	101
<b>Tableau 5.1.</b> Solution optimale du système hybride.....	142
<b>Tableau 5.2.</b> Etat de charge variable –Cas 1-.....	143
<b>Tableau 5.3.</b> Etat de charge constant –Cas 2-.....	143

# Listes des Acronymes et Symboles

## Acronymes

GES	Gaz à Effet de Serre
SER	Système Energie Renouvelable
SEH	Système Energie Hybride
SHSER	Système hybride à source d'Energie Renouvelable
GPV	Générateur Photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
MAS	Machine Asynchrone
MS	Machine Synchrone
MSAP	Machine Synchrone à Aimant Permanent
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
CA	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
GD	Générateur Diesel
SOC	Etat de Charge de la batterie
MPPT	Poursuite du Point de puissance Maximale
P&O	Perturbation et Observation
IncCond	Incrémentation de conductance
GSAP	Générateur Synchrone à Aimant Permanent
PLL	Boucle à Phase Asservie
SOO	Optimisation Mono Objective
MOO	Optimisation Multi Objective
PSO	Optimisation par Essaim de Particule
BESS	Système de Stockage d'Energie par Batterie
FCPSO	Optimisation par Essaim de Particule à Convergence Rapide
TVAC	Temps Variable d'Accélération de Coefficient
RNA	Réseau de Neurones Artificiels

## Symboles

$I_b$	Courant de la Batterie
$E$	Energie de la Batterie
$I_L$	Courant de photo-généré
$I_0$	Courant de saturation
$q$	Charge de l'électron
$k$	Constante de Boltzmann
$m$	Facteur d'idéalité relatif au module
$T_c$	Température de jonction de la diode
$R_s$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance shunt
$I_{sc}$	Courant de court-circuit
$V_{oc}$	Tension à circuit ouvert
$I_m$	Courant au point de puissance maximale
$V_m$	Tension au point de puissance maximale
$I$	Courant de charge
$I_D$	Courant de diode



$I_{Rsh}$	Courant de fuite d'une cellule PV
$N_{cell}$	Nombre de cellule connectés en série par module
$N_{ser}$	Nombre de modules connectés en série par chaîne
$G_{ci}$	Conductance instantanée
$V_{moy}$	Vitesse moyenne
$m_a$	Masse d'air
$\rho$	Densité d'air
$S$	Surface des pales
$P_t$	Puissance totale d'une turbine éolienne
$C_p$	Coefficient de puissance
$\Omega_t$	Vitesse de rotation des pales de la turbine
$\lambda$	Vitesse instantanée du vent
$R_t$	Rayon de la surface balayée
$V$	Vitesse du vent
$P_m$	Puissance mécanique
$C_{aer}$	Couple de la turbine éolienne
$C_m$	Coefficient du couple
$C_p(\lambda, \beta)$	Coefficient de puissance
$\beta_t$	Angles d'inclinaison des pales
$C_{mec}$	Couple mécanique total
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_g$	Couple issu du multiplicateur
$C_f$	Couple résistant
$\beta$	Angle de calage
$P_{m\_opt}$	Puissance optimale
$T_{m\_opt}$	Couple optimum
$T_g^*$	Couple de référence
$I_d^*$	Courant de référence
$[U_s]$	Tension du stator
$[I_s]$	Courant du stator
$[\psi_s]$	Flux du stator
$[U_f]$	Tension du rotor
$[I_f]$	Courant du rotor
$[\psi_f]$	Flux du rotor
$E_0$	Tension constante de la batterie
$V_p$	Tension de polarisation
$\tilde{A}$	Zone de l'amplitude exponentielle
$B_t$	Zone exponentielle d'un temps inverse constant
$V_{batt}$	Tension de la batterie
$V_{DC}$	Tension du bus continu
$G_T$	Rayonnement solaire

$P_{pv}$	Puissance de sortie du panneau PV
$\gamma$	Température constante
$T_c$	Température ambiante
$P_{w_{max}}$	Puissances de sortie nominale
$P_{f0}$	Puissances de sortie à vitesse de coupure
$P_w$	Puissance de sortie de l'éolienne
$v_{ci}$	Vitesse de vent à coupure
$v_{co}$	Vitesse de vent à découpage
$v_p$	Vitesse de vent nominale
$v_w$	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu
$P_{hyb}$	Puissance produite par le système hybride
$N_w, N_{pv}$	Nombres d'unités du système éolien et photovoltaïque
$\overline{P}_a$	Puissance moyenne
$SOC_{min}$	Etat de charge minimale
$SOC_{max}$	Etat de charge maximale
$N_b$	Nombre de batterie
$C_{db}$	Capacité de la batterie
$E_{max}$	Energie maximale
$E_{min}$	Energie minimale
$P_{ch}(t)$	Puissance de charge de la batterie
$P_{dch}(t)$	Puissance de décharge de la batterie
$c_{ch}$	Limite de charge de la batterie
$c_{dch}$	Limite de décharge de la batterie
$\eta$	Rendement de charge et de décharge de la batterie
$P_{tot}(t)$	Puissance totale du système hybride
$V_i^k$	Vitesse de la particule
$X_i^k$	Position actuelle de la particule
$\omega$	Poids d'inertie
$c_1, c_2$	Facteurs de pondération
$P_{best,i}$	Meilleure expérience d'ième particule
$G_{best}$	Meilleure particule
$\omega_{max}$	Poids d'inertie maximale
$\omega_{min}$	Poids d'inertie minimale
$Pmd$	Dimension particulaire moyenne
$C_s$	Coût net présent
$n$	Nombre des sources d'énergies renouvelables
$N$	Nombre d'unité ou de la capacité
$CC$	Coût de capital
$RC$	Coût de remplacement et d'opération
$MC$	Coût de maintenance
$K$	Constante correspond au coût de remplacement
$L_1$	Nombre de durée de vie

$L_2$	Nombre de remplacement des SERH
$i_r$	Taux d'intérêt réel
$PWA$	Coefficient du coût présent
$C_{G_i}$	Coût du réseau
$C_g$	Prix d'achat du micro-réseau
$B$	Bénéfice

### 1.1. Contexte Général

La population mondiale connaît une croissance continue, avec une dépendance accrue sur la technologie, ce qui entraîne une augmentation de la demande d'énergie. Actuellement, la principale source d'énergie provient des ressources conventionnelles limitées telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Les ressources mondiales en combustibles fossiles sont en baisse, et la capacité de produire du pétrole de haute qualité, bon marché et économiquement extractible à la demande va bientôt s'épuiser. L'utilisation des combustibles fossiles est également nuisible à l'environnement. En effet, lorsque les combustibles fossiles sont brûlés pour produire de l'énergie, ils émettent des gaz à effet de serre, du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et des oxydes d'azote NO<sub>x</sub>. Le dégagement de ces gaz dans l'atmosphère contribue au changement climatique et à la production de pluies acides. L'émission de certains gaz à effet de serre a également un effet néfaste sur la couche d'ozone, qui est en train de s'épuiser [1,2].

L'augmentation de la demande d'énergie, la diminution des ressources en combustibles fossiles, ainsi que les problèmes environnementaux liés à la combustion des combustibles fossiles ont accru le besoin des ressources énergétiques alternatives. Les ressources renouvelables, qui ne s'épuisent pas, incluent le soleil, le vent, la terre et l'eau. De ce fait, on assiste au cours de cette dernière décennie à une augmentation dans la recherche du développement de technologies pour utiliser ces ressources [2].

Les énergies renouvelables sont exploitées de différentes manières dans différentes régions du monde. Les gammes de ressources renouvelables utilisées comprennent la biomasse, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'hydroélectricité et l'énergie solaire. Chacune de ces technologies renouvelables a ses avantages et ses inconvénients. Les énergies hydroélectrique et géothermique sont spécifiques à l'emplacement de leurs énergies primaires, ce qui limite leur utilisation. Le développement de la biomasse a eu des implications sur la production alimentaire, car pour produire cette énergie avec un meilleur rendement, il faut occuper des terres fertiles et par conséquent, baisser

la production agricole et entraîner une importante déforestation. Les éoliennes nécessitent un entretien régulier en raison des pièces mobiles et ne sont pas considérées esthétiquement attrayantes. L'énergie solaire a aussi ses inconvénients. Cependant, les panneaux photovoltaïques (PV) nécessitent une maintenance minimale, ne génèrent aucun bruit et leur coût continu à diminuer au cours des prochaines années. Ces sources d'énergies, dites aussi productions dispersées, peuvent être raccordées soit au réseau électrique, soit alimenter un site isolé [1-2].

La solution la plus étudiée pour améliorer la durabilité de l'infrastructure de production d'énergie dans les sites isolés est la mise en œuvre des systèmes hybrides d'énergies renouvelables (SHER) décentralisés. Ces systèmes combinent deux ou plusieurs énergies renouvelables. L'objectif principal est d'exploiter les ressources renouvelables disponibles afin d'améliorer l'efficacité globale et la rentabilité du système en termes de coût et de disponibilité, sachant que le bilan « écologique », est supposé a priori favorable [2].

Comme une grande partie des pays en développement bénéficie d'un nombre élevé de jours ensoleillés, ainsi que du vent, un système hybride solaire/éolien est naturellement une solution digne d'analyse. Cependant, les énergies solaire et éolienne peuvent être catégorisés comme des sources intermittentes, car il ne s'agit pas d'une alimentation continue et ne répond pas à la demande de charge d'électricité depuis un certain temps. Pour ces deux types d'énergie renouvelable, l'énergie éolienne est la source la plus affectée par rapport à l'énergie solaire en raison de son inconstance. De même, ces deux sources d'énergie imprévisibles, autonomes, produiront une énergie électrique fluctuante et ne pourront donc pas assurer le niveau minimum de continuité de puissance requis par la charge.

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système hybride photovoltaïque - éolien peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement. Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas, mais au contraire, peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on se propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles [3,4]. Le stockage d'énergie au moyen des batteries d'accumulateurs est considéré dans ce travail, dont le but de stocker le surplus d'énergie fournie par le système hybride, et d'assurer la continuité d'approvisionnement en électricité en cas d'une défaillance dans le réseau électrique [5].

## **1.2. Problématique**

Avec la progression rapide des marchés des énergies renouvelables, l'importance de combiner différentes sources d'énergie dans un système hybride d'énergie renouvelable (SEH) a gagné plus d'attrait. Ces systèmes hybrides peuvent surmonter les limites des technologies individuelles de

production en termes de rendement énergétique, d'économie, de fiabilité et de flexibilité. L'une des principales préoccupations est la nature stochastique des ressources photovoltaïques (PV) et éoliennes. Le vent n'est souvent pas corrélé avec les profils de charge et peut parfois être mis au rebut lorsqu'il est disponible en abondance. En outre, l'énergie solaire est disponible uniquement pendant la journée. Un système d'énergie hybride composé de stockage d'énergie, de production renouvelable et non renouvelable peut atténuer les problèmes liés aux incertitudes et aux fluctuations des énergies renouvelables.

En raison de la nature aléatoire des sources d'énergie alternatives, le profil de charge électrique, ainsi que la réponse non linéaire des composants du système, pour n'en citer que quelques-uns, n'est pas facile à évaluer la performance du système énergétique hybride ; par conséquent, la conception de systèmes d'énergie hybride est une tâche complexe. Une optimisation qui dimensionne le plus efficacement les composants du système hybride pour réaliser les objectifs économiques, techniques et de conception s'avère nécessaire.

### **1.3. Objectifs de la thèse**

L'objectif de cette thèse est d'une part de développer une analyse approfondie des avantages que la technologie des systèmes hybrides pourrait apporter à la crise énergétique mondiale ; la simulation d'un système hybride PV/éolien connecté au réseau et ensuite de rechercher une solution optimale d'un système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) en vue d'obtenir un coût économique avec un dimensionnement minimum de ce système.

Les méthodes intelligentes ont prouvé leur efficacité dans de tel système complexe. De ce fait, une méthode métaheuristique telle que la méthode d'optimisation par des essaims de particules (PSO) est appliquée pour résoudre le problème d'optimisation. Cette dernière est comparée avec d'autres méthodes améliorées à base de PSO telles que Fast Convergence (FCPSO), Time Varying Acceleration Coefficient (TVAC-PSO) et la méthode développée nommée (FC-TVAC-PSO) qui a été effectué par l'hybridation des deux méthodes améliorées cité précédemment.

### **1.4. Structure de la thèse**

Le travail présenté dans cette thèse est organisé en six chapitres répartis comme suit :

Le chapitre 1 présente le contexte général relatif à la problématique, les objectifs de recherche et offre une brève description de la méthodologie de cette thèse de doctorat.

Dans le deuxième chapitre, après une étude historique sur les crises énergétiques mondiales et aussi en ALGERIE, un état de l'art sur les énergies renouvelables et les systèmes hybrides autonome

ou connectés au réseau électrique est présenté. Les systèmes de stockage d'énergie sont ensuite introduits en mettant en relief leur importance dans le maintien de la disponibilité d'alimentation.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation mathématique et la simulation du système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) en considérant la connexion du réseau électrique. Les simulations sont réalisées sous environnement Matlab/Simulink.

Le quatrième chapitre présente une revue de synthèse sur les techniques d'optimisation des systèmes hybrides disponibles dans la littérature. Ce chapitre met en relief les objectifs d'optimisation et du dimensionnement des composants pour les systèmes d'énergies renouvelables hybrides en discutant les avantages et inconvénients de ces méthodes et les méthodologies abordés par les différents auteurs.

Le cinquième chapitre aborde l'optimisation du système hybride, dans le but de minimiser le dimensionnement avec un bénéfice du coût. Une nouvelle stratégie de gestion d'énergie est proposée entre le système hybride et le réseau électrique. Une méthode métaheuristique comme le PSO est appliquée et comparée avec d'autres méthodes d'optimisation à base du PSO. Les résultats de simulation obtenus sous environnement Matlab sont ensuite commentés et analysés.

Le sixième chapitre présente les conclusions générales de ce travail en mettant en exergue les principales contributions et propose également quelques recommandations pour des futures investigations sur cette thématique de recherche.

Pour une bonne lecture du contenu de cette thèse, l'annexe A présente les paramètres du système d'énergie hybride connecté au réseau électrique utilisé.

# Chapitre 02

## Systemes hybrides d'énergies renouvelables

---

### 2.1. Introduction

La problématique de l'utilisation des énergies naturelles est double. Tout d'abord, il s'agit de répondre à la préoccupation d'utiliser des ressources renouvelables, telles que l'eau, le vent, le soleil et celles qui se reconstruisent par le cycle des saisons, aussi bien dans l'hémisphère Nord que dans le Sud et sous toutes les latitudes. Une deuxième préoccupation est la sauvegarde de l'environnement et du climat. L'utilisation des énergies fossiles constitue une grande source de rejet d'énorme quantité de gaz à effet de serre, mettant en danger la couche d'ozone et l'alternance des saisons. D'où le désir de trouver des alternatives, qui permettent à la fois de ne pas arrêter la construction du bien-être de l'ensemble de l'humanité et de ne pas détruire l'univers.

Ce chapitre présente des généralités sur les énergies renouvelables après avoir mis en exergue la crise énergétique mondiale. Ensuite, une présentation des systèmes hybrides avec différents types de stockage d'énergie alimentant une charge ou connecté au réseau électrique, en mettant en relief leur importance et structure, est exposée.

### 2.2. Crise énergétique mondiale

La crise d'énergie résulte de la fin prévisible d'un cycle, celui du pétrole, du gaz et du charbon, qui, en plus, a produit un accroissement considérable de gaz à effet de serre (GES), cause majeure du réchauffement climatique. Or, la sécurité énergétique constitue l'une des préoccupations majeures des pays industrialisés et celle-ci n'existerait plus en cas de rupture ou d'épuisement de la chaîne du pétrole. Au rythme actuel de la croissance de la consommation énergétique mondiale d'une part et de la diminution des ressources disponibles d'autre part, la catastrophe « d'un monde en manque d'énergie » apparaît inévitable dans le proche avenir. L'énergie va devenir incontestablement un enjeu déterminant au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Ainsi, il faut à tout prix chercher des substituts aux énergies fossiles [1].



Les énergies conventionnelles, actuellement les plus répandues, concernent le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium. Les trois premières, d'origine fossile, fournissent près de 80 % de la consommation mondiale. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) estime qu'en 2030 la proportion restera semblable, même si le charbon aura repris plus d'importance. Ces trois sources ont acquis une place centrale en raison de leur rendement énergétique élevé.

En 2006, le pétrole fournissait 35 % de l'énergie mondiale, le charbon 23 % et le gaz 21 %. Les réserves de pétrole représentent quant à elles 18 % des réserves mondiales d'énergies fossiles et permettent une marge d'exploitation estimée à 40 ans avec le rythme de consommation actuel. Les pays de l'OPEP (Organisation des Pays producteurs de Pétrole), qui possèdent les réserves les plus abondantes de près de 78 % de ces réserves, devraient augmenter leur production de trois millions de barils par jour. Or, la demande ne fait que croître. Son accroissement fut de 83 millions de barils en 2005 et a atteint 115 millions en 2015[6].

Le charbon est en meilleure posture quant à l'état de ses réserves, mais malheureusement, son utilisation provoque l'émission dans l'atmosphère de 9000 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an. En 2004, il entrainait pour 39 % dans la production de l'électricité mondiale et quand on sait que la demande de cette dernière devrait augmenter de 60 % d'ici 2030, grande est la tentation de recourir au charbon pour répondre au besoin. C'est bien ce que les pays émergents sont en train de faire.

L'utilisation du gaz naturel est moins coûteuse en émission de GES que le pétrole, dans une mesure que l'on estime à environ un tiers. Il est pratiquement inoffensif en dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Mais tout comme pour le pétrole, les réserves sont limitées. Si aujourd'hui le gaz entre pour 21 % dans la consommation d'énergie et pour 20 % dans la production de l'électricité, son espérance de vie est estimée à quelques 60 ans à partir du seuil de 2005[1].

Le combustible nucléaire contribue à près de 16 % dans la production mondiale d'énergie. En Europe, 164 réacteurs produisent 28 % du courant électrique. La France se distingue à cet effet, et compte en 2011, 19 centrales nucléaires en exploitation pour un total de 58 réacteurs nucléaires de puissance. L'énergie électrique produite en 2010 a été de 408 TWh, soit 74 % de la production d'électricité dans le pays (550 TWh) et 16 % de l'énergie électrique d'origine nucléaire produite dans le monde. Ceci place la France au 2<sup>e</sup> rang des pays producteurs d'électricité nucléaire dans le monde. Le Royaume Uni compte 14 centrales nucléaires en activité qui fournissent 20 % de l'électricité. Sur le plan de l'efficacité immédiate, l'énergie nucléaire dispose de nombreux avantages. Ainsi, 25 kg d'uranium produisent 1 GW d'électricité, soit l'équivalent de 2700 tonnes de charbon dans une centrale thermique. Par ailleurs, les 441 centrales nucléaires réparties dans le monde évitent d'émettre 3 000 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> [1,6].

Il faut donc bien conclure que la crise des énergies non renouvelables est réelle. Au rythme actuel leur utilisation épuiserait l'ensemble des réserves du monde pour l'année 2100. Ainsi, le constat est clair : seules les énergies renouvelables sont garanties de l'environnement et économiquement rentables à long terme pour l'approvisionnement en énergie.

### 2.3. Energies renouvelables

On appelle énergie renouvelable un ensemble de ressources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, infiniment disponibles, particulièrement gratuites et sont compatibles avec quelque considération environnementale. Une source d'énergie est dite renouvelable à cause de sa disponibilité d'utilisation. Les technologies des énergies renouvelables offrent la promesse d'une énergie propre et abondante recueillie à partir de ressources auto-renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la terre et les plantes. L'intérêt croissant pour le développement des énergies renouvelables est motivé par plusieurs constats : le changement climatique, l'augmentation de la demande d'énergie, la limitation des réserves de combustibles fossiles, le faible rendement global du système énergétique en particulier des pays occidentaux [6].



**Figure 2.1.** Différents types d'énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont des sources propres, renouvelables et gratuite, et peuvent présenter des avantages et aussi des inconvénients qu'on peut les considérés lors de l'utilisation.

#### 2.3.1. Avantages des énergies renouvelables

- Les énergies renouvelables sont disponibles naturellement ;
- Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre ;

- Les conséquences des accidents, dus à ces énergies, ne sont pas importantes et ils sont faciles à résoudre par rapport aux énergies conventionnelles (centrale nucléaire ou pétrolière) ;
- Le coût d'une énergie renouvelable est principalement fixé par l'investissement industriel ;
- La destruction des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux ;

### 2.3.2. Inconvénients des énergies renouvelables

- L'intermittence des sources des énergies renouvelables (à l'exception de l'énergie géothermique) ;
- Les énergies renouvelables demandent de l'espace et ont un impact sur les usages des territoires ;
- Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre, et inversement (l'énergie issue de la combustion de la biomasse est propre à condition que la production ne soit pas excessive et permette à la flore de réabsorber tout le dioxyde de carbone dégagée) ;
- La construction des installations influence l'aspect visuel du paysage ;
- Les sources renouvelables offrent une variation indépendamment de la demande, comme les énergies solaire et éolienne qui exigent l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie.

## 2.4. Types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables se subdivisent en cinq types d'énergies, à savoir éolienne, solaire, biomasse, géothermique, hydraulique et marine.

### 2.4.1. Énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable, propre, bon marché et abondamment disponible. Elle est reçue sur Terre sous forme cyclique, intermittente et diluée avec une très faible densité de puissance de 0 à 1  $kW/m^2$ . L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et parvenant à la surface de la Terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre. Le soleil rayonne environ  $3,8 \times 10^{26} W$  de puissance dans toutes les directions. Sur ce, environ  $1,7 \times 10^{17} W$  est reçu par la Terre.

On distingue deux façons d'exploiter l'énergie solaire : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque.

### a. L'énergie solaire thermique

L'utilisation de l'énergie solaire thermique consiste à utiliser l'énergie thermique obtenue par le rayonnement du soleil pour chauffer un fluide, en fonction de sa température, est utilisé pour produire de l'eau chaude et même vapeur.

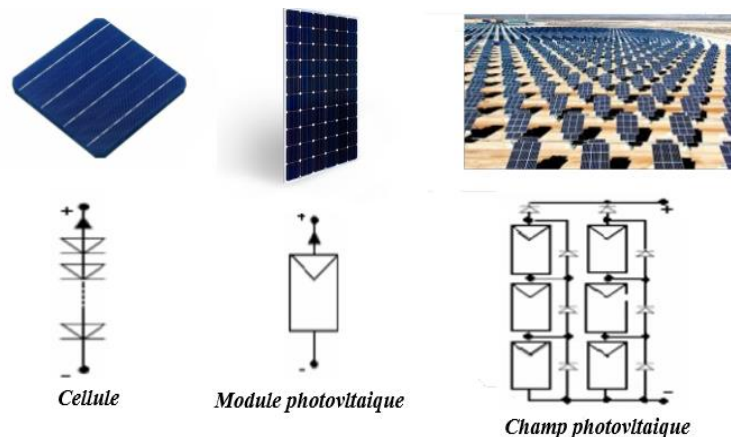
### b. L'énergie solaire photovoltaïque

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) se fait grâce à la conversion directe de l'énergie solaire en électricité par l'effet photovoltaïque. Cette transformation est effectuée par des cellules photovoltaïques. Celles-ci sont constituées de matériaux semi-conducteurs (par exemple, du silicium) qui produisent de l'électricité lors de leur frappe par le rayonnement solaire.

#### 2.4.1.2. Effet photovoltaïque

Lorsqu'une cellule photovoltaïque est soumise au flux lumineux incident, elle va interagir de telle façon qu'une partie du flux soit :

- Réfléchi ;
- Diffusée ;
- Absorbée ;
- Transmise.



**Figure 2.2.** Diversification du système photovoltaïque

Le système solaire est composé d'éléments capables de convertir une partie de l'énergie solaire reçue, soit directement ou indirectement en énergie électrique.

#### – Système solaire à conversion directe :

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique avec l'utilisation d'une technologie nommée « photopile », c'est un effet physique de certains matériaux (l'effet photovoltaïque) [7]. L'effet photovoltaïque, fut observé la première fois en 1839 [8], par le

physicien français EDMOND BECQUEREL. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux ÉTATS-UNIS, arrivèrent à fabriquer la première photopile, qui représenté l'élément primaire ou de base du système photovoltaïque. Le mot "photo" vient du grec qui désigne lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien ALESSANDRO VOLTA qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité ou l'unité de tension électrique est aussi nommée "volt". L'électricité se produit sans bruit, sans parties mécaniques et sans que des produits toxiques soient dégagés [9].

– *Système solaire à conversion indirecte :*

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique avec l'intermédiaire de deux technologies au minimum.

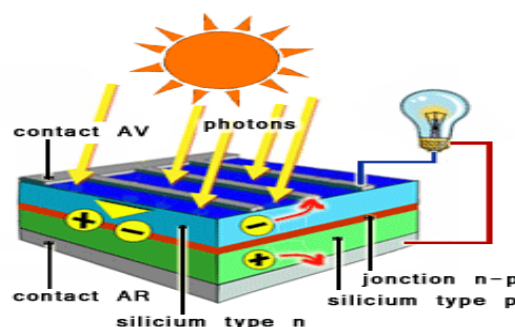
### 2.4.1.3. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [10]. Elle permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.

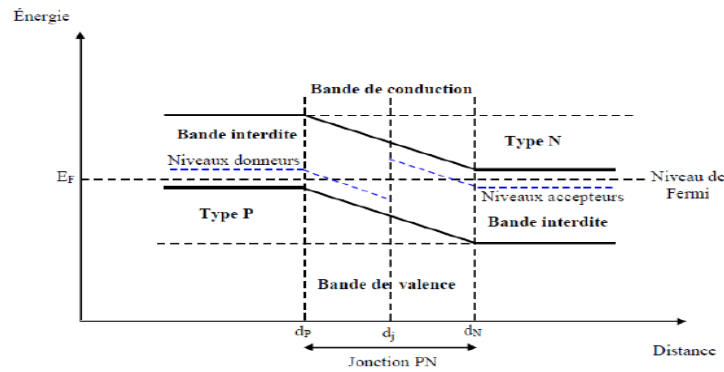
En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques ;
- Pour la couche P, trous ou déficit d'électrons.

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux, captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel séparant les couches N et P, d'être attiré par la couche chargé positivement p et donc d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur comme illustré dans la figure 2.3. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [6].



**Figure 2.3.** Schéma d'une cellule photovoltaïque.



**Figure 2.4.** Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

Quand un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence ont tendance à être arrachés/décrochés. Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est convertie en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons décrochés créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement convertie en énergie électrique, ce qui nous donne l'effet PV. Les systèmes photovoltaïques peuvent être trouvés en deux classes soit en autonome ou non autonome.

#### 2.4.1.4. Types de cellules solaires

Le matériau le plus répandu dans les cellules photovoltaïques est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. La transformation de ce matériau pour arriver au produit fini qu'est la cellule nécessite beaucoup d'énergie. On estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner 2 à 4 ans selon sa technologie pour produire l'énergie nécessaire à sa fabrication.

On utilise également l'arséniure de gallium et des couches minces comme le CdTe (tellure de cadmium) et le CIS (Cuivre-Indium-Disélénium) et encore le CIGS (Cuivre Indium Gallium Disélénium). Il existe plusieurs types de cellules, qui sont [11,12] :

##### a. Silicium monocristallin

Ce sont les premières cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. Ensuite, le cristal est découpé en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'une couleur uniforme, souvent noire. Leur rendement normalisé est de 12 à 20%.

Cellules en silicium monocristallin ont une durée de vie élevée de plus ou moins 30 ans. Les données concernant la longévité sont relatives au fait que la production de la cellule diminue en vieillissant. Les fabricants donnent généralement une baisse de production de 0.5% par an et une performance minimale d'environ 85% au bout de 25 ans. Elles présentent deux inconvénients :

- Leur prix élevé ;
- Un temps de retour sur investissement en énergie élevé (jusqu'à 6 ans en zone peu favorable).

### ***b. Silicium polycristallin***

Les cellules sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est souvent bleu avec des motifs montrant de gros cristaux enchevêtrés. Leur durée de vie est également de plus ou moins 30 ans. Leur rendement est de l'ordre de 11 à 15 % mais elles engendrent un coût de production moins élevé que les cellules monocristallines.

### ***c. Silicium amorphe***

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposée une fine couche de silicium amorphe (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Le rendement de cette technologie est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines mais leur prix est bas et permet, à condition d'occuper plus de superficie, de produire une électricité relativement bon marché. Elles ont également l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et la lumière fluorescente et donc, elles sont plus performantes aux faibles intensités lumineuses, telles qu'on en rencontre en environnements intérieurs. Elles ont une durée de vie d'environ 10 ans fortement conditionnée par l'exposition aux rayonnements à fort intensité.



(a)

(b)

(c)

(d)

**Figure 2.5.** Types de cellule photovoltaïque.

- (a) Silicium poly cristallin.
- (b) Silicium mono cristallin.
- (c) Silicium poly cristallin.
- (d) Silicium amorphe.

### 2.4.1.5. Association de cellules

La cellule PV élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs PV sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres pouvant exister dans un réseau de cellules PV en fonctionnement. En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairage et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau de cellules (ombrages par exemple) [6]. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension. Les cellules ensuite sont assemblées pour former des modules.

Enfin, pour constituer un panneau, il faut connecter des modules en série afin d'obtenir une tension suffisamment élevée pour être exploitable par les onduleurs permettant le raccordement au réseau et des groupements de modules en parallèle afin d'augmenter la puissance.

### 2.4.1.6. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Un module PV est caractérisé par les paramètres suivants :

- **La puissance crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards ( $T = 25^\circ C$  et un éclairage de  $1000 W/m^2$ ).
- **La caractéristique  $I(V)$** : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum  $(V_m, I_m)$**  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m \cdot I_m$ .
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Le ratio entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule  $V_{co} \cdot I_{cc}$ , et qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique.

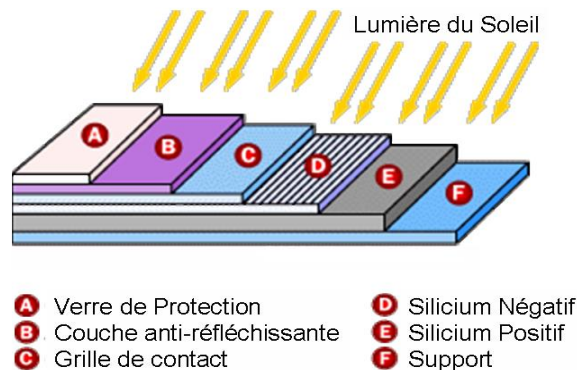


### 2.4.1.7. Principaux composants d'un système solaire photovoltaïque

Un système PV est constitué des éléments principaux suivants :

#### a. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque (GPV) représente l'outil de transformation de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux, dont chacun est composé de plusieurs modules. Chaque module contient un certain nombre des cellules à base de silicium (connectées en série ou en parallèle ou en série/ parallèle).



**Figure 2.6.** Structure d'une cellule solaire en silicium.

#### b. Stockeur d'énergie (batterie ou accumulateur)

Il a pour but de stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. L'intégration d'unité de stockage dans un système photovoltaïque n'est pas toujours indispensable car elle dépend de la nature d'application.

#### c. Système de contrôle (régulateur)

Dans le cas où la batterie est utilisée avec le système PV, le régulateur a pour rôle d'assurer la sécurité et le bon fonctionnement entre ces deux systèmes. Il est constitué souvent d'un convertisseur (dévolteur, survolteur ou les deux au même temps) et des jeux de contact. Les hacheurs ou les convertisseurs continu-continu ont pour objectif d'offrir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

Les convertisseurs statiques sont composés des éléments actifs et passifs sophistiqués et qualifiés qui permettent un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande. Aussi, les pertes par commutation limitent la fréquence de commutation et la durée de vie des porteurs impose indirectement des butées de rapport cyclique.

### 2.4.1.8. Convertisseurs d'énergie

L'électronique de puissance permet de réaliser, à l'aide d'éléments semi-conducteurs fonctionnant en interrupteurs, l'interface entre deux sources électriques, en l'occurrence un GPV constitué d'un assemblage de cellules, et une charge comprenant éventuellement un dispositif de stockage tampon ou encore une source alternative dans le cas d'un débit sur le réseau électrique, en assurant [6]:

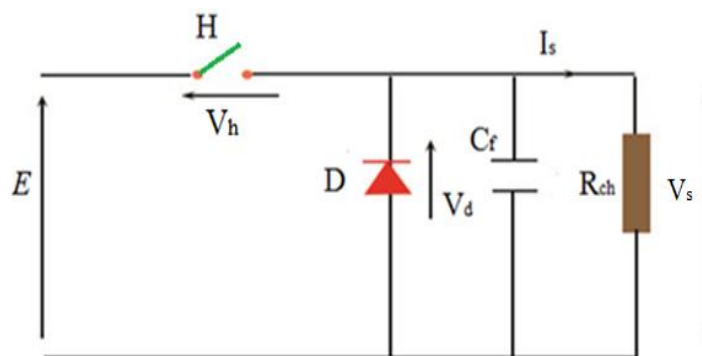
- Le réglage de certaines grandeurs (amplitude, fréquence, phase) ;
- Et/ou un changement de forme de celle-ci (alternatif  $\Leftrightarrow$  continu).

### 2.4.1.9. Hacheur

#### a. Hacheur série

Il est composé d'un interrupteur  $H$  commandable et unidirectionnel et d'une diode de roue libre  $D$  qui permet d'assurer la continuité de la circulation du courant lorsque la charge est inductive. Ces deux composants sont complémentaires. L'un est passant pendant que l'autre est bloqué et vice versa. Le coefficient  $\alpha$ , rapport du temps de fermeture de l'interrupteur  $H$  sur la période  $T$  et nommé rapport cyclique, est réglable. Il permet de faire varier la valeur moyenne de tension  $V$  [6]:

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E \cdot dt = \frac{\alpha T}{T} E = \alpha E \quad (2.1)$$



**Figure 2.7.** Schéma d'un hacheur série.

Le hacheur série est un abaisseur de tension. La valeur moyenne ne peut pas être supérieure à  $E$ .

#### b. Hacheur parallèle

Il est composé comme le hacheur série, sauf l'architecture est différente (Figure 2.8). La valeur moyenne de la tension  $V$  est donnée par la relation suivante :

$$V_{moy} = E = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T V_c . dt = (1 - \alpha) V_c \quad (2.2)$$

$$V_c = \frac{E}{1 - \alpha} \quad (2.3)$$

Le hacheur parallèle est un élévateur de tension. La valeur moyenne peut être supérieure à  $E$ .

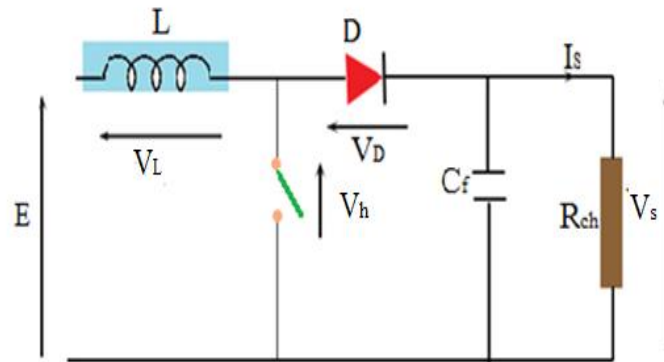


Figure 2.8. Schéma d'un hacheur parallèle.

### c. Hacheur série-parallèle

Le convertisseur hybride (série-parallèle) comporte les deux hacheurs cités précédemment et comme montré dans la figure 2.9, qui définit que la tension moyenne de sortie  $V_{moy}$  est inférieure ou supérieure par rapport à l'entrée  $E$ . La tension moyenne à la sortie est évaluée par :

$$V_{moy} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} . E \quad (2.4)$$

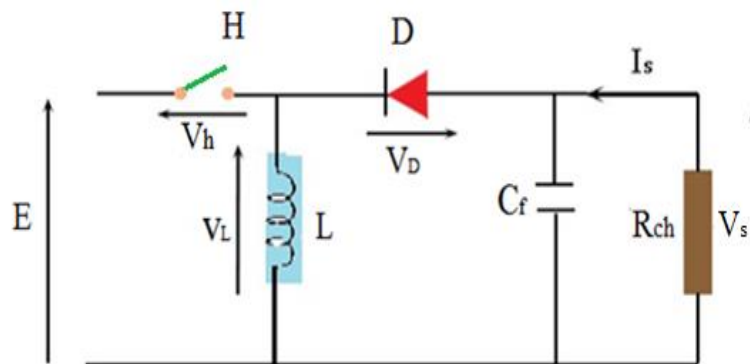


Figure 2.9. Schéma d'un hacheur série-parallèle.

### 2.4.2. Énergie éolienne

Le vent est la source de l'énergie éolienne. Il résulte de différentes influences qui sont étudiées par les météorologues et climatologues, son énergie provient des différences de rayonnement solaire et

refroidissement entre l'équateur et les pôles. Les variations de température induites créent des zones de basses et hautes pressions entre lesquelles se déplacent les masses d'air.

La compréhension d'un aérogénérateur nécessite de tenir compte de facteurs très complexes et multiples et donc de connaître les domaines scientifiques et techniques associés (structure, aérodynamique, contrôle, électrotechnique...) qui ne sont pas le propre de l'éolien. Et, au-delà de chaque sous-système qu'il faut bien entendu, comprendre, améliorer et fiabiliser, il ne faut surtout pas oublier que l'éolienne constitue un ensemble dont les différentes parties interagissent ensemble. On doit alors évoluer vers une approche systématique pour le contrôle de la machine que pour l'optimisation de sa conception et de son fonctionnement.

### **2.4.2.1. Types d'éoliennes**

Il existe deux types d'éoliennes modernes : les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical.

#### **a. Eolienne à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont des machines au vent avec deux ou trois pales, habituellement faites de matériaux composites comme la fibre de verre. Elles fonctionnent comme les anciens moulins à vent, et ce type de turbines est la plus ancienne conception. Une turbine à axe horizontal est constituée d'un rotor avec des pales, d'un train d'entraînement (qui comprend généralement une boîte de vitesses et un générateur) et d'une tour pour améliorer l'accès au vent. La tendance générale a été l'émergence des éoliennes tripales puisque la puissance récupérable est fonction (dans une certaine limite) du nombre de pales, et qu'un rotor tripale représente un excellent compromis entre la puissance récupérable et le coût de la machine. De plus, les efforts subis par la machine sont mieux équilibrés et visuellement parlant, la rotation d'un rotor tripale est perçue d'une façon plus harmonieuse (et donc esthétique) que celle d'un rotor bipale ou d'un rotor monopole [6]. De nombreuses éoliennes disposent d'un système automatique de régulation de survitesse pour empêcher le rotor de tourner hors de contrôle lorsque les vents sont forts.

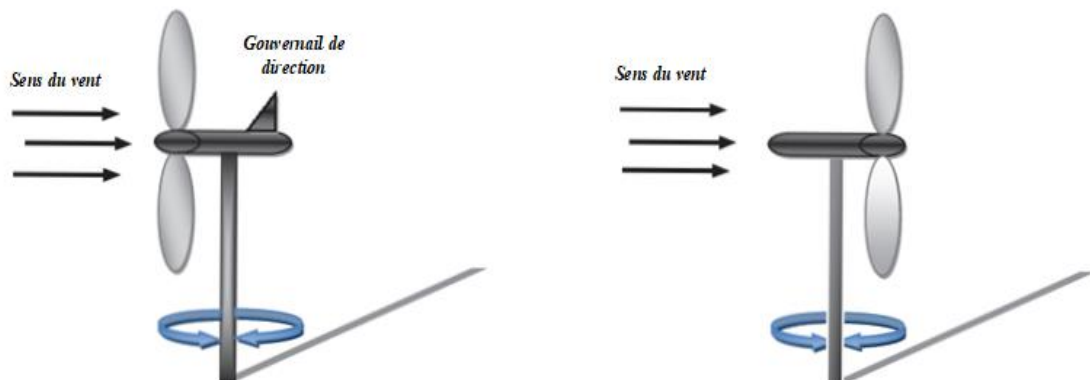
Ces éoliennes ont pris le dessus sur celles à axe vertical car elles présentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontale, et les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6 MW [6].



**Figure 2.10.** Éoliennes à axe horizontal.

La plupart de ces éoliennes sont des capteurs omnidirectionnels, c'est à dire qu'elles doivent orienter leur rotor par rapport au vent, soit de façon passive (empennage), soit de façon active (avec engrenage). Les rotors des éoliennes classiques sont placés face au vent et intègrent certains dispositifs permettant un positionnement face au vent. Les éoliennes de petites tailles (inférieures à 50 kW) utilisent essentiellement le contrôle passif de l'orientation via le gouvernail pour des raisons de simplicité. Certains gouvernails sont équipés d'amortisseurs ou d'autres dispositifs destinés à réduire la vitesse d'orientation de l'éolienne face au vent et surtout les oscillations de direction. Au-delà d'une certaine taille (de l'ordre de 300 kW), les éoliennes utilisent un système d'orientation actif qui permet de maintenir la turbine face au vent de façon plus stable. Une girouette placée au sommet de la nacelle envoie des signaux à un système motorisé qui oriente mécaniquement la nacelle face au vent [6].

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur l'utilisation de la force de portance sur chaque pale. La turbine est supposée orientée face au vent qui présente une certaine vitesse, mesurée loin devant la turbine (vitesse à l'infini amont). En effet, le flux d'air est perturbé par la présence de la pale avant de l'avoir touché et il est dévié avant d'atteindre le bord d'attaque de la pale, comme illustré dans la figure 2.11.



**Figure 2.11.** Orientation de la turbine d'une éolienne à axe horizontal

### ***b. Éolienne à axe vertical***

Les éoliennes à axe vertical captent la vitesse du vent quelle que soit sa direction. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol et présentent de fortes turbulences compte tenu du fort impact du relief, ce qui affaiblit la puissance générée par rapport à une captation centralisée à plus grande hauteur.

Les turbines à axe vertical offrent la possibilité de loger sur leur base tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.). Même si pour des questions de sécurité, cette turbine doit être inaccessible. Ces éléments sont localisés à une hauteur beaucoup plus faible que pour les turbines à axe horizontal, facilitant ainsi les opérations de maintenance. On peut distinguer deux types de turbines à axe vertical : le rotor de SAVONIUS reposant sur le principe de traînée différentielle, le rotor de DARRIEUS reposant sur la variation cyclique d'incidence (ou portance) [6].



**Figure 2.12.** Éoliennes à axe vertical.

Il existe une grande variété de tailles et de puissances des éoliennes, et le tableau 2.1 montre la différence entre ces types d'éoliennes [13] :

**Tableau 2.1.** Classification des turbines éoliennes.

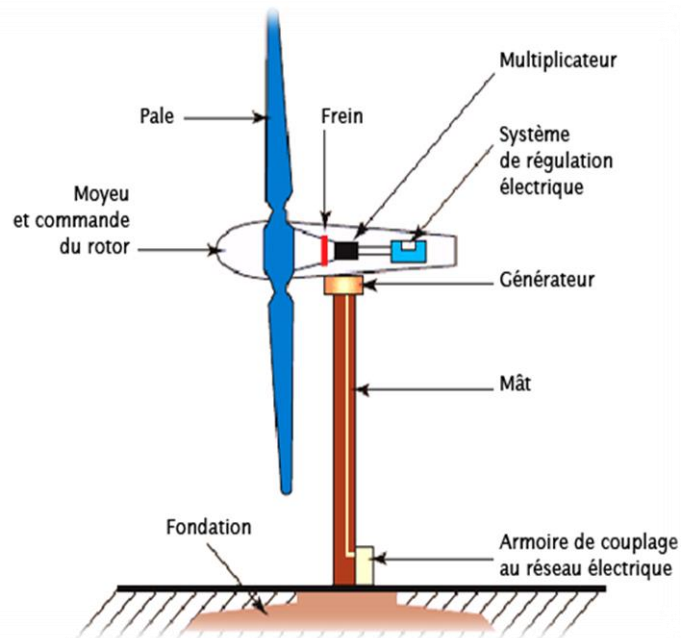
<i>Echelle</i>	<i>Diamètre de l'hélice</i>	<i>Puissance délivrée</i>
<i>Petite</i>	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
<i>Moyenne</i>	12 m à 45m	De 40 kW à 1 MW
<i>Grande</i>	46 m et plus	1 MW et plus

#### ***2.4.2.2. Constitution d'un système éolien à axe horizontal***

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie. Les principaux constituants d'une turbine sont montrés dans la figure 2.13 :

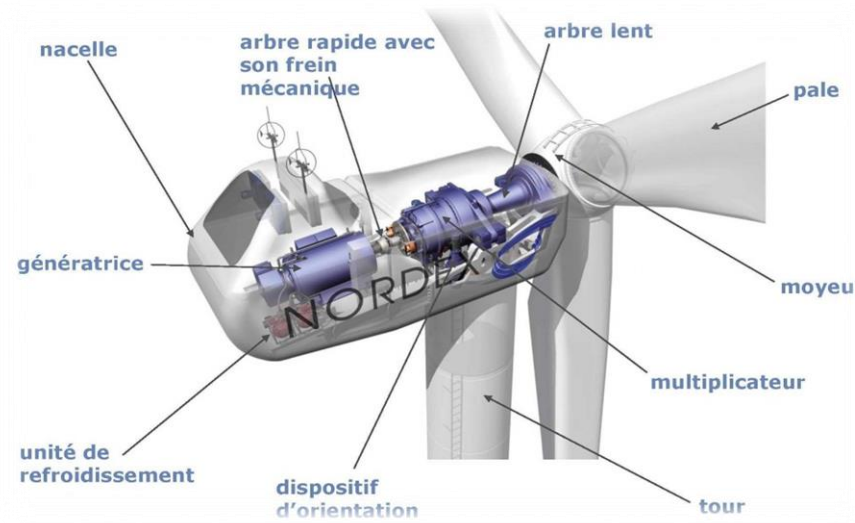


**Figure 2.13.** Composants d'une turbine éolienne.

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments (figure 2.14) [14] :

- **Le moyeu** : C'est l'organe qui supporte les pales, est-il est fixé à l'arbre lent de l'éolienne.
- **La turbine** : Possède en général trois pales qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique permet généralement d'orienter les pales et ainsi de contrôler le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par (mise en drapeau) ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.
- **La nacelle** : Partiellement insonorisée, avec une armature métallique, accueille la génératrice et son système de refroidissement, le multiplicateur de vitesse et différents équipements électroniques de contrôle qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

– **Le multiplicateur de vitesse** : Comporte un arbre lent supportant la turbine et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tr/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque, auquel est accouplé le générateur. Le multiplicateur de vitesse est pourvu d'un système de refroidissement pour l'huile.



**Figure 2.14.** Constitution d'un système éolien.

- **Arbre de transmission** : lie le moyeu du rotor au multiplicateur, et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Générateur électrique** : Il peut être un générateur à courant continu ou un alternateur. Dans tous les cas, il transforme l'énergie mécanique qui lui transmet le rotor, en énergie électrique.
- **Système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir le générateur et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.
- **Un mât (tour)** : Supporte la nacelle et la turbine. Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur. Il est tubulaire et accueille une échelle voire un ascenseur.

### 2.4.2.3. Zones de fonctionnement

Le fonctionnement de la turbine éolienne dépend de la vitesse du vent. On distingue quatre zones de fonctionnement comme montré dans la figure 2.15 [15] :



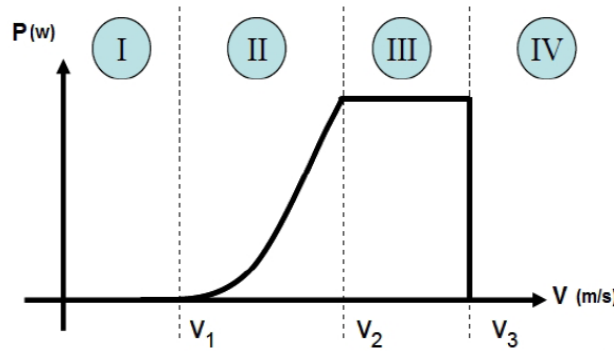


Figure 2.15. Zone de fonctionnement d'une éolienne.

$V_1$  : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.

$V_2$  : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale du générateur.

$V_3$  : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales.

– **Zone I** :  $V < V_1$

La vitesse du vent est trop faible, la turbine ne fonctionne pas, par conséquent la puissance extraite est nulle.

– **Zone II** :  $V_1 < V < V_2$

Dans cette zone, un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale pour chaque vitesse du vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

– **Zone III** :  $V_2 < V < V_3$

La vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance disponible arrive à des trop importantes, la puissance extraite est donc limitée à l'aide du système d'orientation des pales « pitch control », tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

– **Zone IV** :  $V > V_3$

La vitesse du vent devient trop forte. Un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

#### 2.4.2.4. Modes de fonctionnement d'un système éolien

Les conditions de fonctionnement d'une turbine éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. On ne peut agir qu'en limitant, parfois de manière

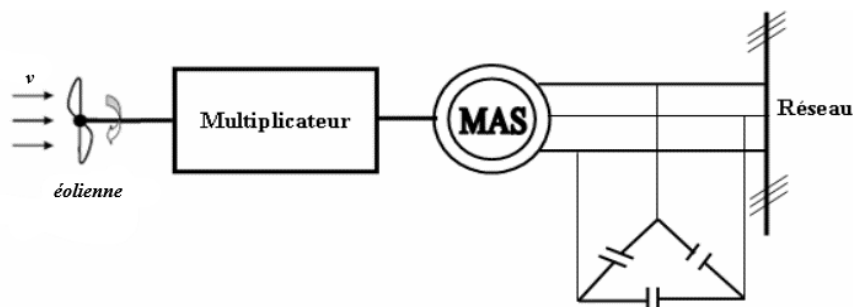
optimale dans certaines conditions de fonctionnement, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique [14].

Il existe généralement deux modes de fonctionnement d'une éolienne, celles à vitesse fixe et l'autre à vitesse variables, et chaque mode de ces deux technologies contient sa propre structure tout dépend de type de générateur. Dans ce cas, on trouve trois types principaux du système éolien qui sont [16] :

- Système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage;
- Système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (*MADA*) ;
- Système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants.

### **a. Systèmes utilisant la machine asynchrone**

La machine asynchrone (MAS) prend de nos jours une grande utilisation dans les installations éolienne. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût. Une topologie comprend le raccordement direct d'une MAS à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS.

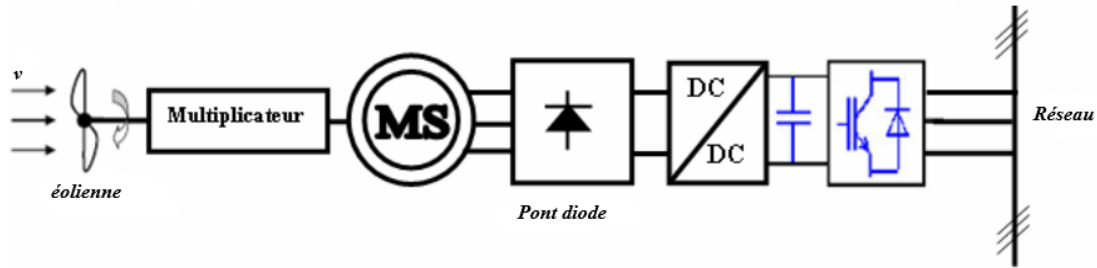


**Figure 2.16.** Machine asynchrone connectée directement au réseau

L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et aussi les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [17].

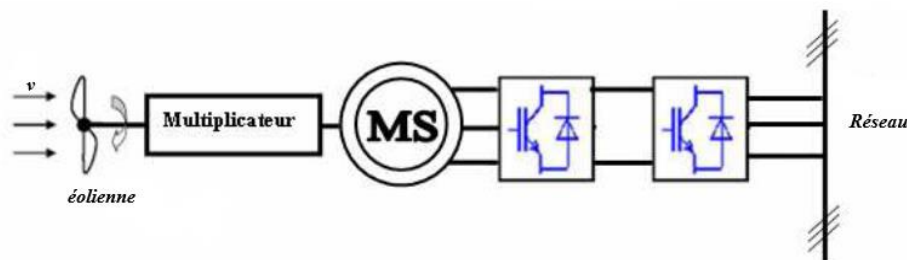
### **b. Systèmes utilisant la machine synchrone**

La machine synchrone à l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles.



**Figure 2.17.** Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble des convertisseurs.

Cette configuration présente un redresseur à diodes associé ou non à un convertisseur CC/CC. Elle est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI, de plus le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la chaîne de conversion est plus faible. La machine synchrone peut être associée à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et de maximiser la puissance comme indiqué la figure 2.18. Cette topologie utilisant un redresseur à diodes et un convertisseur CC/CC (boost) était considérée comme la configuration optimale par CARLSSON au regard du coût, de la qualité de l'énergie et du facteur de puissance [18]. La MAS peut être aussi reliée avec cette configuration, ou le redresseur MLI affirme la magnétisation et le banc de condensateurs n'est plus nécessaire.



**Figure 2.18.** Machine synchrone connectée au réseau à travers un convertisseur MLI en cascade.

### 2.4.3. Énergie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité exploitée. La production mondiale au début des années 2000 est de 2700 TWh par an, avec une capacité installée de 740 GW. Elle pourrait passer à 8100 TWh à l'horizon 2050 avec un doublement économique compétitif de la capacité installée. Les barrages permettent de stocker l'énergie et de la fournir dans les moments de forte demande [6].

L'hydroélectricité produite de l'énergie par conversion de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique au moyen d'une turbine hydraulique couplée à un générateur électrique. C'est une source d'énergie qui maîtrise le stockage d'énergie potentielle et capte les flux d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages. Elle présente un inconvénient dont l'influence sur l'environnement aquatique, besoin des grosses installations et limite des sites d'utilisation [19].

#### 2.4.4. Énergie de la biomasse

La biomasse est, sous réserve d'une exploitation durable de la ressource, une énergie renouvelable qui fournit des biocombustibles généralement sous forme solide et des biocarburants généralement sous forme liquide. Le bois couvre plus de 10% de la demande en énergie primaire dans beaucoup de pays d'ASIE, d'AFRIQUE et d'AMERIQUE LATINE, et certains pays d'Europe (SUEDE, FINLANDE, AUTRICHE). L'usage du bois dans les pays en développement a fortement augmenté ces dernières décennies, mais cette ressource n'a pas toujours été exploitée durablement entraînant la déforestation [6].

La biomasse est fréquemment utilisée dans des systèmes de cogénération qui produisent de l'électricité comme les centrales classiques tout en valorisant la chaleur, habituellement perdue, dans des applications variées : chauffage des locaux, besoins industriels, agriculture... Cette technologie permet d'accroître l'efficacité de la conversion énergétique. Les biocarburants liquides, plus coûteux à l'obtention et industriellement produit à partir de culture énergétique (colza, tournesol, blé, maïs, orge...), sont mieux valorisés dans les applications de transports. Ils sont actuellement utilisés dans des moteurs thermiques essentiellement en étant mélangés en faible quantité dans les carburants traditionnels dans le but d'améliorer leurs caractéristiques [6].

#### 2.4.5. Énergie géothermique

La température de notre planète augmente considérablement lorsque l'on se rapproche de son centre. Dans certaines zones de notre planète se trouve en profondeur de l'eau à température élevée. La géothermie haute température (150 à 300°C) consiste à pomper cette eau vers la surface, à produire de la vapeur via des échangeurs pour ensuite turbiner cette vapeur comme dans les centrales thermiques classiques et ainsi produire de l'électricité. Les ressources géothermiques à basse température (inférieure à 100°C) sont valorisées avec des pompes à chaleur pour les besoins de chauffage [6].

Le potentiel de la géothermie naturelle est cependant limité, car il existe de nombreux sites où la température est élevée (supérieure à 200°C) mais sans eau. Cette ressource thermique peut être exploitée au moyen de la technologie dite des « roches chaudes et sèches » en cours de développement. Elle consiste à injecter par un premier puits de l'eau sous pression dans des zones profondes (supérieures à 3000 m) de roches fracturées. Cette eau réchauffée remonte par un second puits et permet de produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques classiques. Toutefois, la part de ce potentiel qui sera techniquement accessible n'est pas encore précisée [6]. Cette source peut assurer la fiabilité et la disponibilité de l'énergie dans le temps car c'est une énergie qui ne dépend pas des conditions climatiques comparée avec les autres énergies renouvelables. Bien que la production de l'énergie géothermique soit gratuite et l'installation de cette dernière demande un coût très élevé.

### 2.4.6. Energie marine

L'énergie des marées peut être utilisée pour produire de l'électricité. La houle représente un important gisement d'énergie. la puissance moyenne annuelle sur les côtes de la façade Atlantique est comprise entre 15 et 80  $kW/m$  de côte. Mais le milieu marin est très contraignant et les récupérateurs d'énergie des vagues ne sont pas encore matures, ils ne sont pas encore exploitables à grande échelle. Des prototypes de centrales houlomotrices sont cependant testés [6]. L'énergie d'origine extraite du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement recyclable bien qu'elle donne un potentiel terrible.

Les investissements de ce type d'énergie sont très difficiles dans un environnement hostile et imprédictible. L'utilisation de cette énergie est faible et ne représente qu'une petite quantité de la génération de l'énergie de nos jours par rapport aux autres sources utilisées.

## 2.5. Production des énergies renouvelables

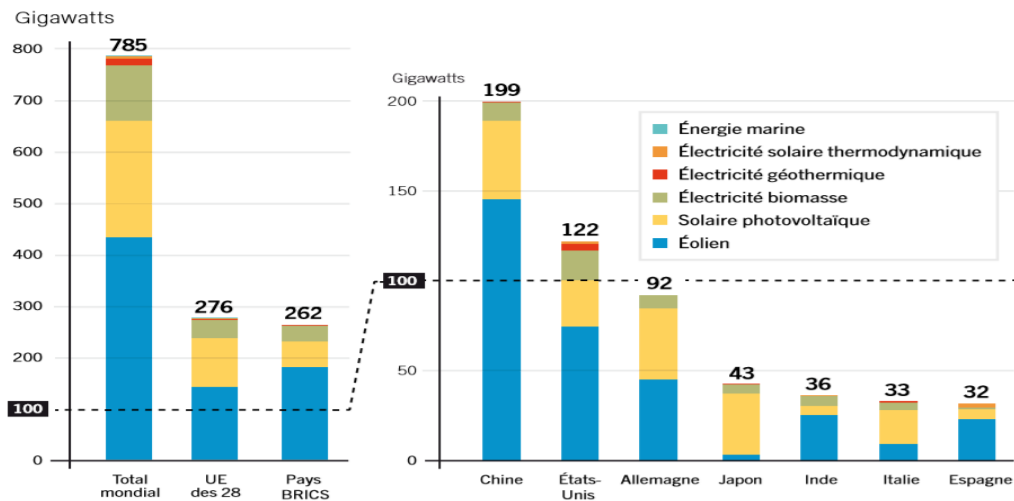
Les énergies renouvelables, et particulièrement l'électricité produite à partir de l'éolien et du solaire, connaissent depuis le début des années 1990 un développement important. En faisant apparaître la part de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde, ainsi dans notre pays l'ALGERIE, qu'il révèle quels sont les pays les plus gros producteurs et les zones les plus dynamiques en termes de potentiels énergétiques.

### 2.5.1. Production dans le monde

Les énergies renouvelables sont maintenant reconnues comme des sources d'énergies habituelles et majeures à travers le monde. Leur croissance rapide, en particulier dans le secteur électrique, est le fruit de plusieurs facteurs. On trouve qu'une diminution de l'électricité nucléaire est effectuée, par contre une progression de l'électricité d'origine renouvelable est atteinte par l'utilisation dans divers domaines.

D'après les dernières statistiques sur l'utilisation et la production des énergies renouvelables dans le monde, on trouve que l'énergie éolienne constitue le plus fort producteur par à rapport aux autres énergies avec plus de 400 GW, plus de 200 GW de l'énergie PV et presque de 100 GW de la production de la biomasse et un faible taux pour les énergies comme le montre la figure 2.19 [20]. Selon l'AIE, le solaire pourrait être la première source de production d'électricité, devant le charbon en 2050. L'ensemble des énergies renouvelables produira alors plus d'électricité que l'ensemble des fossiles, le nucléaire étant réduit à un faible pourcentage (de 5 % à 10%). La production d'électricité éolienne a commencé à devenir significative en 2005, par contre le solaire, photovoltaïque ou

thermodynamique n'a commencé à prendre de l'importance qu'en 2012, mais sa progression est la plus rapide de toutes les sources d'électricité [20].



**Figure 2.19.** Production mondiale des énergies renouvelables –fin 2015- [20].

Dans la figure 2.19 ; les pays BRICS sont : le BRESIL, la FEDERATION de RUSSIE, l'INDE, la CHINE et L'AFRIQUE DU SUD.

### a. Énergie solaire

L'énergie solaire représente 0,5 % seulement de la génération électrique mondiale. Mais l'évolution rapide de l'intégration de ces systèmes permet à considérer que cette part accroîtra de façon étonnante dans le proche future. Dès 2020, cette énergie pourrait atteindre 2,2 % de la production électrique mondiale et dans la seconde moitié du siècle, cette part pourrait augmenter à 30 %. Le solaire thermique à basse température utilise directement la chaleur dans les petites installations. Il représente la plus grande part de l'énergie solaire (plus de 70 %), et la puissance installée été presque de 233 GWh. La CHINE est le plus grand utilisateur de cette chaleur (près de 2/3 de la puissance mondiale), ayant beaucoup investi dans les capteurs solaires, suivi par les ÉTATS-UNIS et l'ALLEMAGNE [21].

Un autre type d'énergie est utilisé comme le solaire thermique à concentration. Il concerne les grandes centrales thermodynamiques qui produisent de l'électricité à partir de la chaleur. On peut dire qu'un développement est dûment fort avec une puissance installée est de 3,1 GWh fin 2013. Il existe dans le monde 70 centrales réparties dans 9 pays, avec deux pays pilotes tels que : l'ESPAGNE (48 centrales) et les ETATS-UNIS (13 centrales). D'autres sont en construction ou en projet, notamment en INDE et en CHINE.

En 2014, l'énergie solaire photovoltaïque a connu une nouvelle année de croissance comme cité dans la figure 2.20, avec une capacité installée estimée à 40 GW pour une capacité mondiale totale

d'environ 177 GW et a été augmenté à 303GW en 2016. La production de cette énergie se situe principalement en CHINE, le JAPON et aux ÉTATS-UNIS [21].

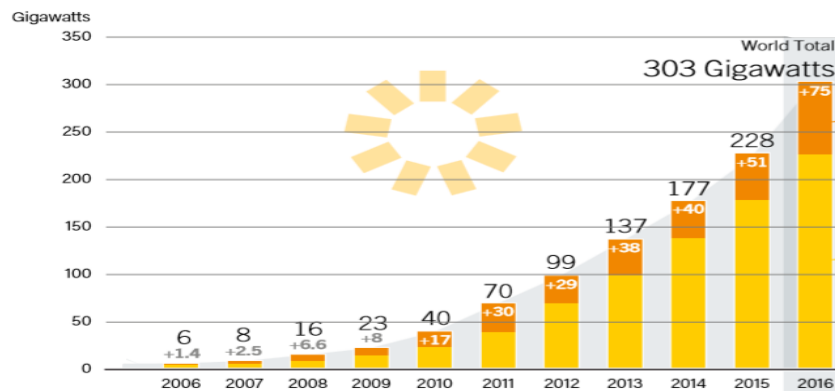


Figure 2.20. Capacités mondiales totales de l'énergie solaire photovoltaïque en 2016 [22].

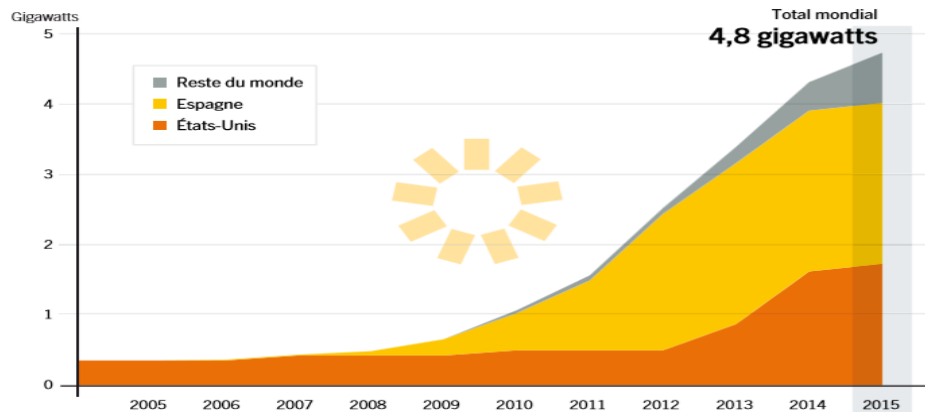


Figure 2.21. Capacités mondiales de l'énergie solaire thermodynamique en 2015-2016 [20].

### b. Énergie éolienne

L'énergie éolienne se développe et est utilisée presque dans tous les pays du monde. Au cours des dix dernières années, sa croissance moyenne a atteint 26% par an. Avec plus de 35 GW de nouvelles puissances établies, l'éolienne a enregistré une croissance de 12% en 2013 mondialement, pour atteindre une puissance de 318 GW à la fin d'année. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), cette croissance continue devrait poursuivre et conduit à un parc installé près de 540 GW en 2017. Avec l'ambition d'atteindre 20% d'énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie en 2020 [21].

En 2016, la puissance totale de l'énergie éolienne à travers le monde est atteinte 487 GW comme montré la figure 2.22. La production de l'énergie éolienne été très fort dans les 10 premiers pays développés comme la CHINE (170 GW), ETATS-UNIS (80 GW), ALLEMAGNE (50 GW), INDE (30 GW), ESPAGNE (25 GW), ROYAUME-UNI (20 GW), la FRANCE (18 GW), CANADA (17 GW), BRESIL (16 GW), et l'ITALIE (15GW) par à rapport aux autres pays du monde [22].

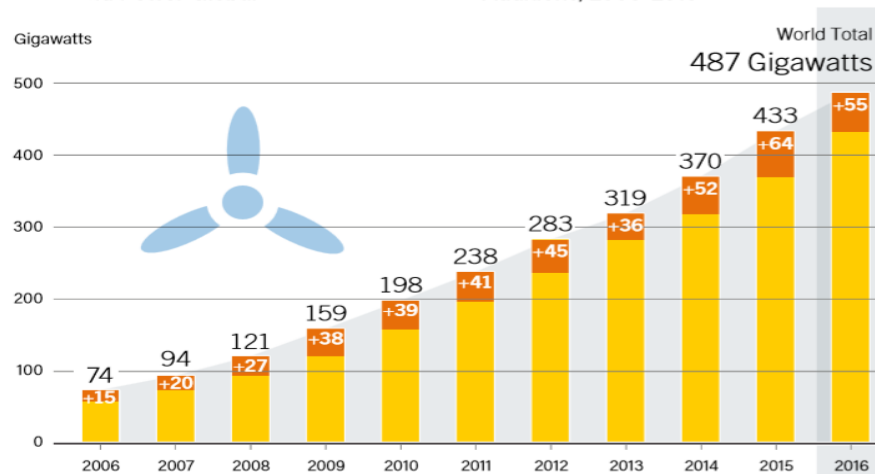


Figure 2.22. Capacité mondiale d'énergie éolienne en 2016 [22].

### c. Énergie de la biomasse

L'électricité issue de la biomasse est principalement produite dans les pays où la production de déchets organiques est importante ; tels que l'AMERIQUE du NORD et l'EUROPE de l'OUEST. La production d'énergie électrique à l'aide de la biomasse dans le monde représente environ 1800 W par seconde, soit 596 TWh / an. La production de chaleur biomasse est restée quasiment stable en 2014, à seulement 1% de plus par rapport au 2013. La production mondiale de bioénergie est augmentée d'environ 9 % dans les premiers pays développés comme la CHINE, le BRESIL, le JAPON qui occupe la première place, les ÉTATS-UNIS et l'ALLEMAGNE [23].

L'électricité de la biomasse devrait atteindre 86 GW en 2021, ce qui en ferait la 4<sup>ème</sup> source d'énergie électrique sur le plan mondial. Selon la prospective publiée par l'Agence sur l'énergie (Visions énergétiques 2030-2050), la biomasse d'origine forestière apportera une contribution majeure à la production d'énergie renouvelable. Ceci implique un plan de mobilisation de la ressource forestière qui permettrait de passer d'un taux de prélèvement sur l'accroissement naturel de la forêt de 48 % (en 2014) à un taux de 75 % en 2030 [22]. La puissance générée par la biomasse est augmentée à 50% (de 10 TWh à 15 TWh) en 2016, et l'électricité totale produite par la biomasse est de 464 TWh/h et 504 TWh/h en 2015 et 2016 respectivement [20], [22].

### d. Énergie géothermique

La production électrique géothermique est d'environ 640 MW qui a été mise en service, et près de 12,8 GW pour une production qui a été estimée à 74 TWh en 2014. La majeure partie de cette nouvelle capacité géothermique a été installée au KENYA, ce qui souligne l'importance croissante accordée à l'énergie géothermique en AFRIQUE de l'EST. La production de la chaleur géothermique été estimée à



263 peta- joules (PJ) en 2014 (73 TWh). Ces dernières années, la capacité électrique totale a progressé de 3,6 % et la capacité de chauffage à 5,9 % [22].

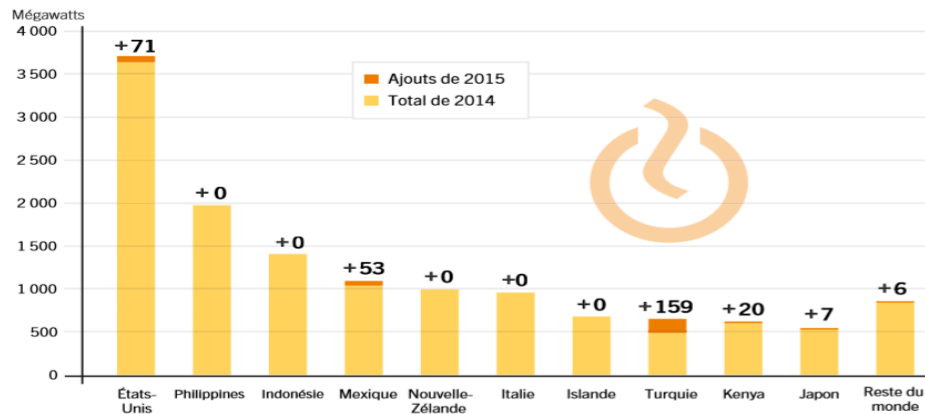


Figure 2.23. Capacité totale de l'énergie géothermique [20].

**e. Énergie hydraulique**

Une évaluation de la puissance hydroélectrique été produit et mise en service près de 37 GW en 2014, et fournissait une capacité mondiale totale environ de 1055 GW, et la production est estimée à 3900 TWh. La CHINE a installé la plus importante capacité (22 GW), juste devant le BRESIL, le CANADA, la TURQUIE, l'INDE et la RUSSIE. La demande d'efficacité et la baisse des coûts de production ont contribué à multiplier les unités de production de plus grande taille en incluant des turbines de 800 MW. Il existe également une forte demande pour la rénovation des centrales existantes en vue d'améliorer l'efficacité des produits, et pour des résultats environnementaux conformes aux nouvelles exigences réglementaires. L'innovation inclut également la mise au point des technologies à vitesse variable qui sont utilisées pour les usines de pompage rénovées ou récentes et contribuent à l'intégration des ressources d'énergie renouvelable variables [22].

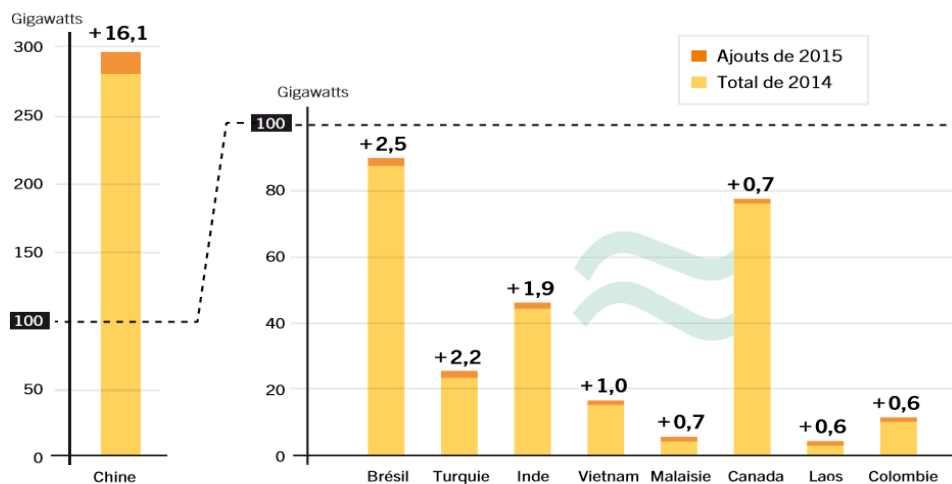


Figure 2.24. Capacité totale de l'énergie hydraulique [20].

## ***f. Énergie marine***

La capacité de l'énergie marine, qui est dominée par la production de l'énergie marémotrice, est environ 536 MW en fin de 2016. Plus de 90 % étaient représentés par deux barrages de marée : l'usine de SIHWA en République de Corée de 254 MW (achevée en 2011) et la centrale marémotrice de La Rance en France de 240 MW. L'énergie houlomotrice a également progressé en 2016 avec plusieurs projets dans le monde entier, notamment en ESPAGNE, en SUEDE, aux ÉTATS-UNIS, en REPUBLIQUE de COREE et en CHINE. L'ESPAGNE a vu son premier convertisseur d'énergie à ondes flottantes connecté au réseau de la plate-forme Biscay Marine Energy (BiMEP), sous la forme d'un prototype de 30 kW. En 2016, l'électricité a commencé de circuler à partir des deux premières turbines d'un projet d'énergie des vagues de 3,4 MW dans la province du ZHEJIANG, en CHINE. La CHINE a également installé une conversion d'énergie thermique marine de 10 kW. Début 2017, le pays a publié son 13<sup>ème</sup> plan quinquennal sur l'énergie des océans, qui concerne 50 MW de capacité installée d'ici 2020 [22].

L'Union Européenne a lancé le forum sur l'énergie marine en vue de rassembler les principaux acteurs, de résoudre les problèmes existants et de coopérer à l'avancée de l'énergie marine. Les technologies ont continué de se développer dans divers sites d'essai [22,23].

### **2.5.2. En Algérie**

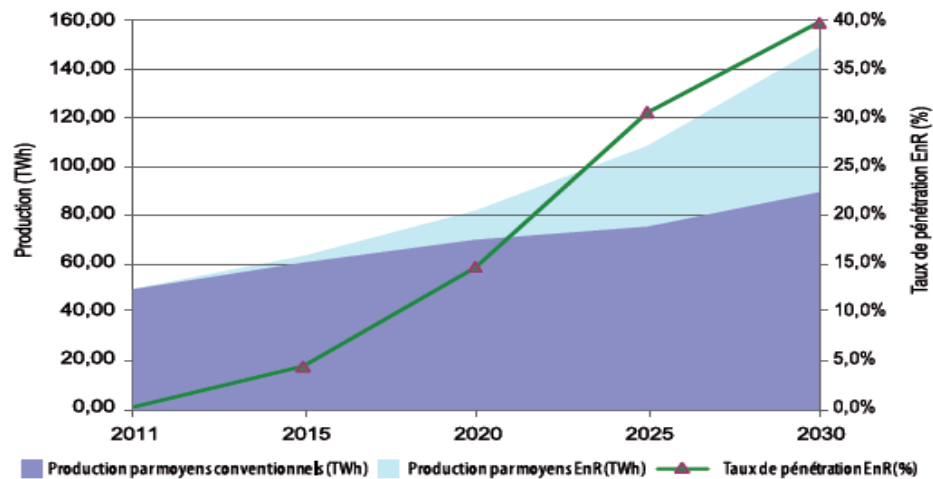
L'ALGERIE est un pays qui possède un potentiel en énergie fossile et renouvelable très appréciable, notamment pour le Gaz et l'énergie solaire. Le taux d'irradiation solaire dans le Sahara est le plus élevé dans la méditerranée. L'économie algérienne se base principalement sur l'exportation des énergies fossiles épuisables et polluantes, chose qui la rend vulnérable. Depuis février 2011, les autorités publiques algériennes ont élaboré un nouveau programme énergétique qui a pour but le développement des énergies renouvelables. Il sera notamment axé sur l'énergie solaire et éolienne.

L'objectif principal de cette nouvelle politique est de préparer le pays à l'ère post-pétrolière et permettre aux populations, en sites enclavés et hors réseau conventionnel, de bénéficier également des avantages indéniables de l'énergie électrique et calorifique à partir des sources d'énergies renouvelables localement disponibles et aisément mobilisables avec les techniques et les technologies mûres actuelles [24].

#### **2.5.2.1. Situation des énergies renouvelables en Algérie**

L'ALGERIE s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en

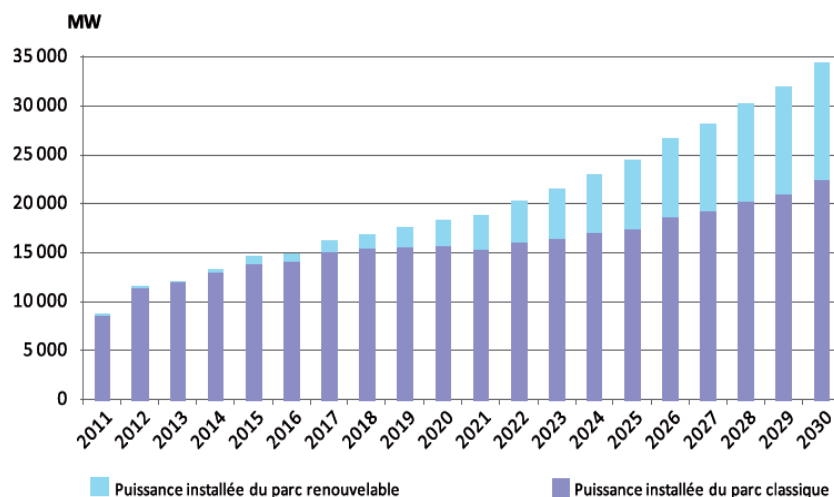
énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur d'un programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. L'ALGERIE prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable [25].



**Figure 2.25.** Production nationale des énergies renouvelables en TWh [25].

Le programme des énergies renouvelables est défini pour [26] :

- 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.
- D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2000 MW.
- D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 22000 MW, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.



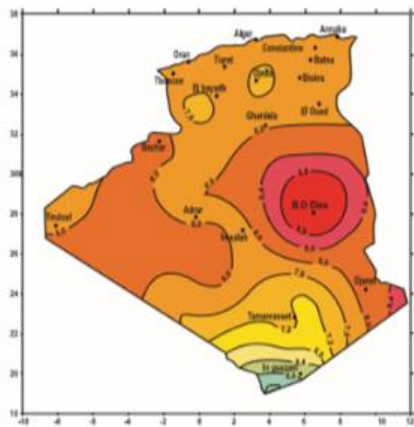
**Figure 2.26.** Installation du parc de la production nationale en MW [25].

**a. Énergie solaire**

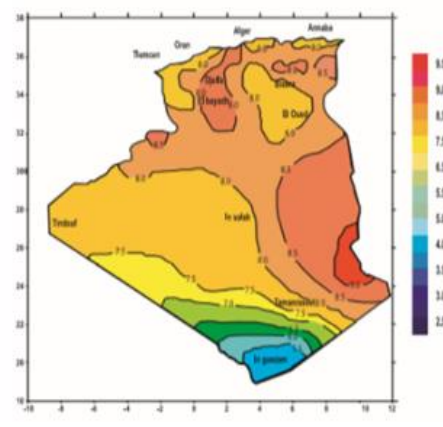
L'ALGERIE dispose d'un gisement solaire énorme surtout dans le sud du pays (Tableau 2.2). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures. Le total d'énergie reçue est estimé à 169400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [24].

**Tableau 2.2.** Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

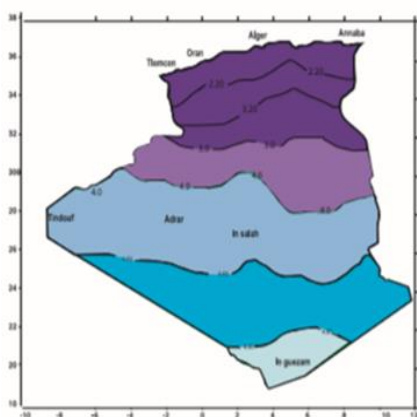


Plan horizontal

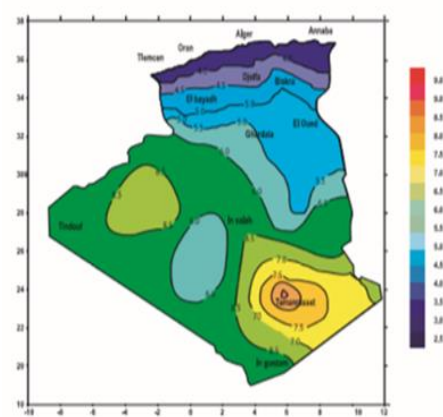


Plan normal

**Figure 2.27.** Irradiation totale journalière au mois de juillet [26]



Plan horizontal



Plan normal

**Figure 2.28.** Irradiation totale journalière au mois de Décembre [26].

- La période 2011-2013 était caractérisée par l'intégration de l'industrie algérienne avec un taux de 60 %. Cet objectif ambitieux devrait être atteint grâce à la réalisation d'une usine de fabrication des modules photovoltaïques d'une capacité équivalente à 120 MWc/an par le Groupe SONELGAZ.

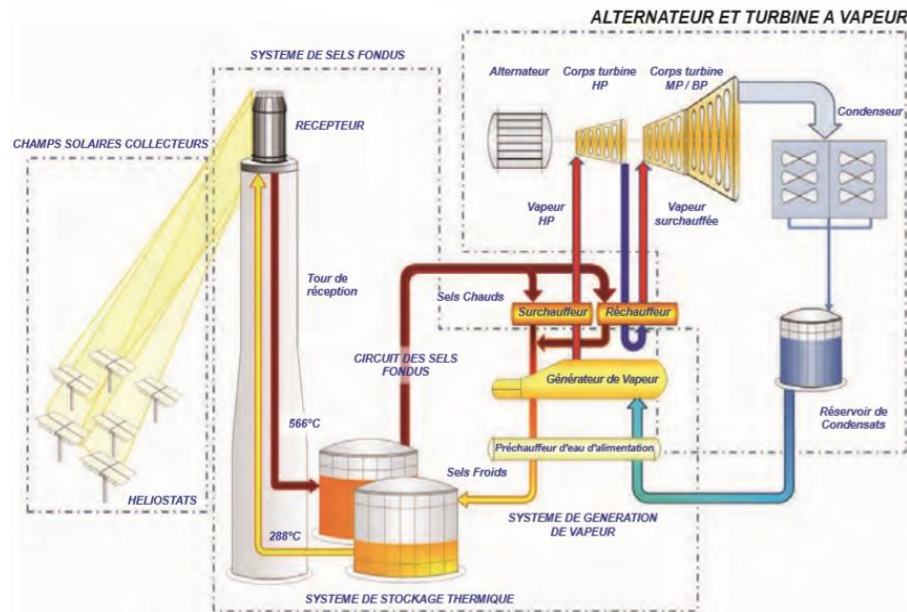
Cette période sera également marquée par des actions de renforcement de l'activité d'engineering et d'appui au développement de l'industrie photovoltaïque à travers la constitution d'une joint-venture qui regroupera les différents acteurs (ROUÏBA-ECLAIRAGE, SONELGAZ, CREDEG, CDER et UDTS) en partenariat avec des centres de recherche.

- Sur la période 2014-2020, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration des capacités algériennes de 80%, et pour ce faire, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium. Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et autres équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque. Il est également prévu la réalisation d'un centre d'homologation des équipements destinés aux installations des énergies renouvelables.
- Sur la période 2021-2030, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration supérieur à 80%. C'est pourquoi, la capacité de production des modules photovoltaïques devrait être étendue pour atteindre les 200 MWh/an. Cette période serait marquée par le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements nécessaires à la construction d'une centrale photovoltaïque. Il est prévu au courant de cette même période d'exporter non seulement l'électricité produite à partir des renouvelables mais aussi le savoir-faire et les équipements entrant dans la production d'électricité à partir des énergies renouvelables [25].

### ***b. Énergie solaire thermique***

La période 2011-2013 a connu un lancement des études pour la fabrication locale des équipements de la filière solaire thermique. Il est prévu un taux d'intégration de 50% à travers la mise en œuvre de trois projets majeurs qui seront menés en parallèle à des actions de renforcement des capacités d'engineering, durant la période de 2014-2020 [25] :

- Construction d'une usine de fabrication de miroirs ;
- Construction d'usines de fabrication d'équipements de fluide caloporteur et de stockage d'énergie ;
- Construction d'une usine pour la fabrication des équipements du bloc de puissance ;
- Développement de l'activité engineering et capacités de conception, procurement et réalisation.



**Figure 2.29.** Centrale thermique solaire avec stockage [25].

Sur la période 2021-2030, le taux d'intégration devrait être supérieur à 80% grâce à la concrétisation des projets suivants :

- Extension de la capacité de fabrication des miroirs ;
- Extension de la capacité de fabrication d'équipements de fluides caloporteurs et de stockage d'énergie ;
- Extension de la capacité de fabrication des équipements du bloc de puissance ;
- Conception, procurement et réalisation de centrales par des moyens propres.

### ***c. Énergie éolienne***

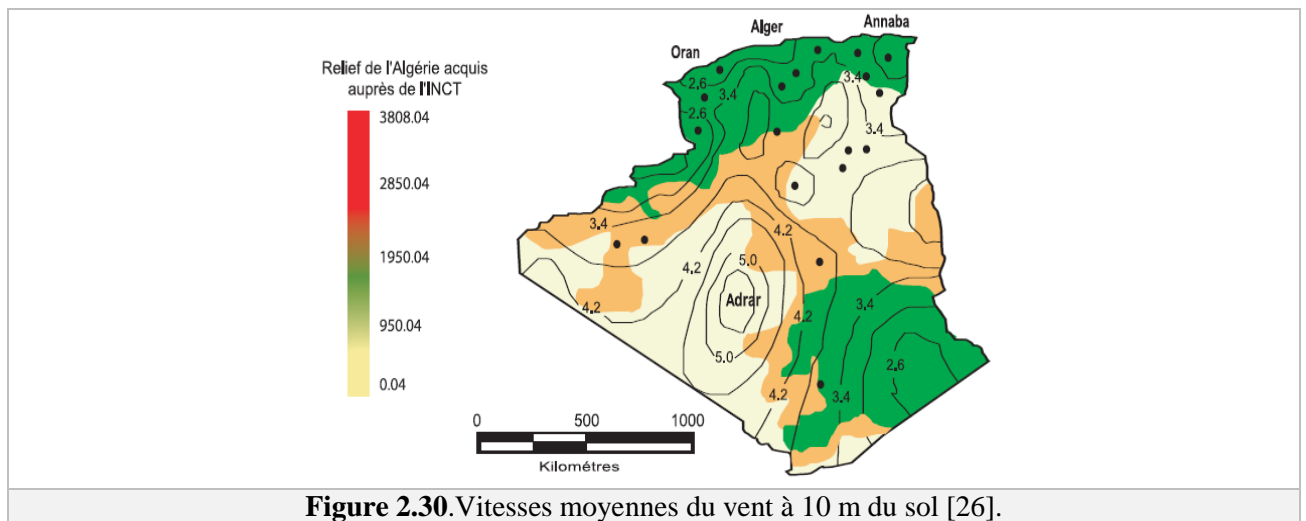
La ressource éolienne en ALGERIE varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes.

Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'ATLAS TELLIEU et l'ATLAS SAHARIEN. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte de la figure 2.30 montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'ADRAR. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'ORAN, BEJAÏA et ANNABA, sur les hauts plateaux de TIARET et KHEITER ainsi que dans la région délimitée par BEJAÏA au Nord et BISKRA au Sud [26].

Sur la période 2014-2020, l'objectif est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Cette période sera marquée par les actions suivantes [25] :

- Construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes ;
- Création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle ;
- Montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception.

Le taux d'intégration devrait être supérieur à 80% sur la période 2021-2030, grâce à l'extension des capacités de fabrication des mâts et des rotors d'éoliennes et le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle. Il est prévu aussi la conception, le procurement et la réalisation d'éoliennes par des moyens propres ainsi que la maîtrise des activités d'engineering, de procurement et de construction des centrales et d'unités de dessalement des eaux saumâtres.



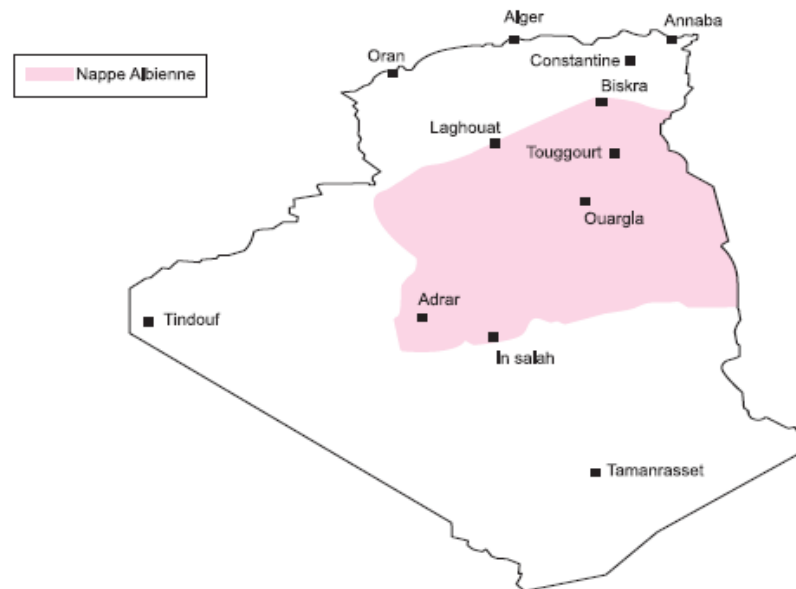
**Figure 2.30.** Vitesses moyennes du vent à 10 m du sol [26].

#### **d. Énergie géothermique**

Les calcaires jurassiques du nord algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement dans les régions du Nord-Est et Nord- Ouest du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam MESKHOUTINE (96°C). Plus au Sud, la formation du continental intercalaire constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km<sup>2</sup>. Ce réservoir, appelé communément « Nappe albiennne » est exploité à travers des forages à plus de 4 m<sup>3</sup>/s. L'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57 °C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albiennne au débit total des sources thermales, cela représenterait en termes de puissance plus de 700 MW [26]. Un tiers environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45 °C. Il existe aussi des sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à

BISKRA. Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dans le gradient dépassent les 5°C/100m [27] :

- Zone de RELIZANE et de MASCARA ;
- Zone de AIN BOUCIF et SIDI AISSA ;
- Zone de GUELMA et DJEBEL EL ONK.



**Figure 2.31.** Nappe Albienne dans l'Algérie [26].

### ***e. Énergie de la biomasse***

Ce type d'énergie contient deux parties de l'énergie de la biomasse, le premier consiste sur le côté de la forêt et l'autre sur la déjection animale :

#### ***a. Potentiel de la forêt :***

L'Algérie se subdivise en deux parties [26] :

- Les régions selvatiques qui occupent 25.000.000 hectares, soit un peu plus de 10% de la superficie totale du pays.
- Les régions sahariennes arides couvrant approximativement 90% du territoire.

Dans le nord de l'ALGERIE, qui figure 10% de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares, la forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en 1 900 000 hectares. Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes généralement importantes pour l'emploi énergétique, maintenant elles occupent que 5% de la forêt algérienne.



### ***b. Déjections animales :***

La valorisation des déchets organiques et particulièrement des déjections animales pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique avec une autonomie énergétique qui permettra un développement durable des zones rurales [26].

### ***c. Énergie hydraulique***

L'énergie hydraulique dans la production électrique globale est de 5% avec 286 MW produite en 2007. Cette faible puissance est due au nombre insuffisant des sites hydrauliques et à la non-exploitation des sites hydrauliques existants [26]. Dans les dernières années le secteur hydraulique possède 103 sites de barrages qui sont recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. Les quantités globales tombant sur le territoire Algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays : concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évolue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliard de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface, 103 sites de barrages sont actuellement en exploitation [27].

Le programme des énergies renouvelables à effectuer pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22000 MW, distribuée par les différents types d'énergies comme suit:

**Tableau 2.3** Répartition des énergies renouvelables du 2015-2030 [26].

<b>Types</b>	2015-2020 (MW)	2021-2030 (MW)	<b>Total</b>
<i>Photovoltaïque</i>	3000	10575	13575
<i>Éolien</i>	1010	4000	5010
<i>CSP</i>	-	2000	2000
<i>Cogénération</i>	150	250	400
<i>Biomasse</i>	360	640	1000
<i>Géothermie</i>	05	10	15
<b>Total</b>	4525	17475	22000

## **2.6. Systèmes hybrides**

Face au problème de variation de la puissance et non garantie fournie par les sources d'énergie renouvelables, il est introduit la combinaison des sources d'approvisionnement et établit un système d'énergie nommé hybride (SEH). Un système hybride à sources d'énergie renouvelables est un système électrique comporte plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable, et aussi peut contenir un système de stockage. L'innovation du système hybride permet d'affirmer l'énergie requise par la charge, et si possible de produire le maximum d'énergie, tout en

maintenant la qualité de l'énergie produit. En outre, ces systèmes d'énergie hybrides peuvent garantir l'investissement dû à l'économie de carburant et la baisse du prix.

Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont affectées par sa conception, qui désigne le dimensionnement et le type des composants, l'architecture, et ainsi le choix de la stratégie de fonctionnement. Certains paramètres permettent d'évaluer ses performances tels que : l'économie de carburant, le coût en kWh, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien ... etc.

Les systèmes d'énergie hybride peuvent fonctionner soit en présence du réseau (connecté au réseau) où la priorité principale du système est de répondre à la demande d'énergie locale et parfois de fournir un surplus d'énergie au réseau. Ou en tant que système autonome de production d'énergie indépendamment de l'utilité du réseau dans les zones isolées. Lorsqu'un système d'énergie hybride comprend de l'énergie solaire ou éolienne, la plupart du temps une source auxiliaire d'énergie (par exemple provenant des batteries de stockage, des piles à combustible ou du réseau électrique public) est nécessaire, est dans le but de surmonter la disponibilité stochastique de ces énergies.

### **2.6.1. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides**

Le système d'énergie hybride peut présenter des avantages et des inconvénients qui peuvent résumés dans ce qui suit [28,29].

#### **2.6.1.1. Avantages**

- Deux sources d'énergie renouvelable ou plus peuvent être intégrées dans un seul système, en fonction du potentiel d'énergie renouvelable local ;
- Aucune forme d'émission n'est produite à partir de tous les systèmes hybrides d'énergie renouvelable (comme le PV et l'éolienne) ;
- Modulaire (PV et système de vent) sont faciles à installer et dans la plupart des cas ne nécessite aucune conception pour un usage domestique ;
- Les systèmes hybrides plus petits sont moins chers que les systèmes plus grands et complexes comme le système nucléaire ;
- Le carburant pour SEH est abondant, gratuit et inépuisable, donc l'énergie électrique produite par ce système est indépendante du prix du carburant.

#### **2.6.1.2. Inconvénients**

- Augmentation de la complexité du système ;

- Difficulté d'optimisation des divers organes du système ;
  - Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du Stockage ;
  - Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel ;
  - La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés).
- Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

### 2.6.2. Classification des systèmes d'énergies hybrides

Les systèmes d'énergies hybrides peuvent être classifiés en deux groupes. On trouve dans le premier type, les systèmes hybrides fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes permettent de satisfaire les besoins de la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe, se trouvent généralement en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs localisés dans des sites éloignés du réseau électrique, tel que les refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc...

Les ressources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus à CA ou à CC dépend de la dimension et la configuration du système. La combinaison de ces deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance comme les onduleurs, redresseurs et les hacheurs [30].

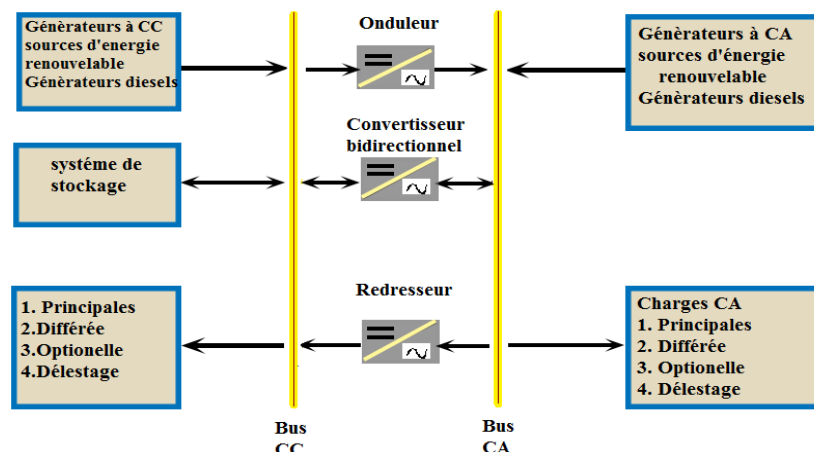


Figure 2.32. Structure générale d'un système hybride [30].

La puissance générée par les SEH peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles. Aussi, les systèmes hybrides ayant une puissance en dessous de 100 kW, la configuration mixte

du bus à CA et à CC avec des batteries de stockage est très répandue. Le système de stockage d'énergie utilise un grand nombre de batteries pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise de petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient en principe des générateurs diesels. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à CC. Par contre, dans les systèmes les plus grands, avec une puissance supérieure à 100 kW, qui sont basés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés [30].

**Tableau 2.4.** Classification des systèmes hybrides par quantité de puissance [30].

<i>Puissance du SEH (kW)</i>	<i>Application</i>
Faible : < 5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales.....
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires).

## 2.7. Configuration des systèmes des énergies hybrides

Les systèmes des énergies hybrides peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations comportent généralement des systèmes d'énergies renouvelables, des systèmes conventionnels et des systèmes de stockages d'énergie qui se trouvent selon différentes architectures :

- Architecture à bus CC (courant continu) ;
- Architecture mixte à bus CC-CA (courant continu-courant alternatif) ;
- Architecture à bus CA (courant alternatif).

### 2.7.1. Architecture à bus à CC

Ce type de configuration est présenté dans la figure 2.33, la puissance produite par chaque système est concentrée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC où les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter directement les charges à CA. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [31].

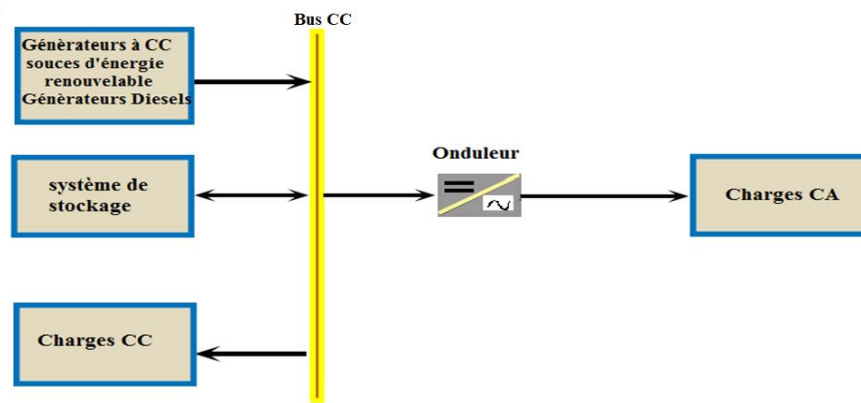


Figure 2.33. Configuration des SEH à bus CC [2].

### 2.7.2. Architecture mixte à bus à CC/ CA

Cette architecture combine les deux bus à CC et à CA, et leur configuration est représentée dans la figure 2.34. Ce type de configuration, les systèmes d'énergies renouvelables et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'élever le rendement du système et de diminuer la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Les générateurs diesels et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur), peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui en fonctionnement normal, effectue la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur). S'il y'a un excès d'énergie du côté du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionnement en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé. L'achèvement de ce système est absolument embrouillé à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du générateur diesel).

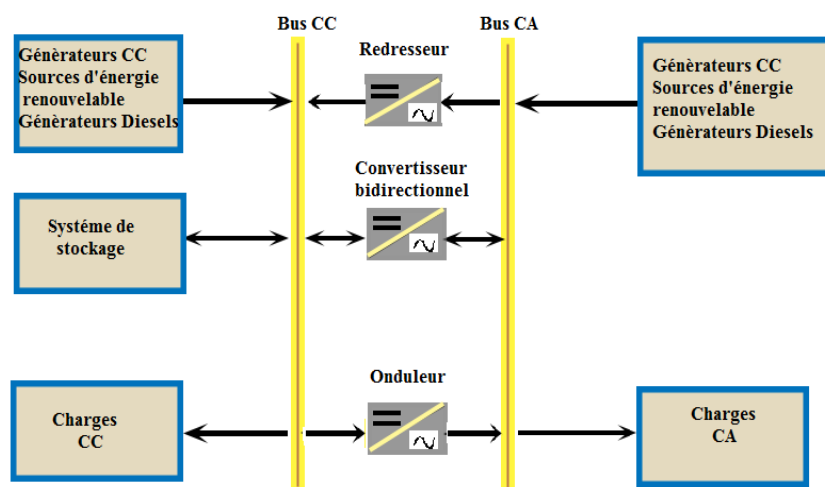


Figure 2.34. Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [2].

### 2.7.3. Architecture à bus à CA

Toutes les sources de productions sont raccordées au bus CA à travers des convertisseurs, ou le générateur diesel permet de fixer la fréquence du bus. Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (figure 2.35) permet d'achever des systèmes flexibles composés de constituants modulaires. En termes des ressources d'énergies utilisées ou appliqués, on peut combiner différents systèmes renouvelables aussi bien conventionnels. Le système peut aussi être accru en toute simplicité par ajout d'autres composants ou des générateurs électriques pour augmenter la production d'énergie. Sachant que la liaison de tous les composants sur un bus à CA rendre le système de commande est plus embrouiller.

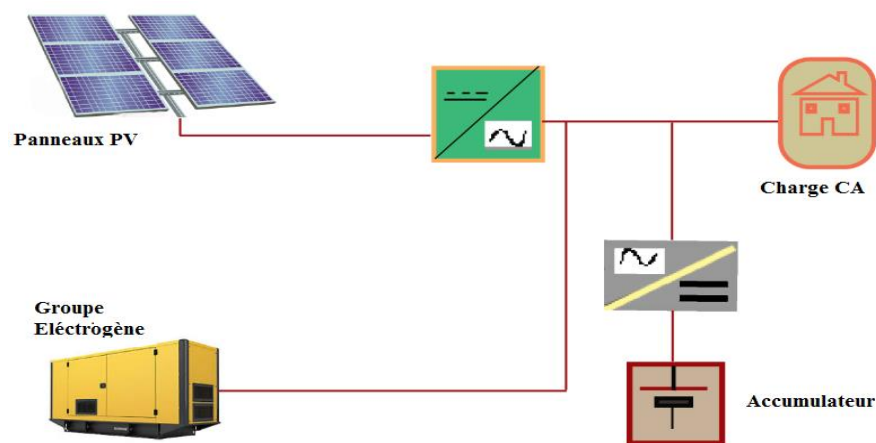


Figure 2.35. Configuration de bus CA.

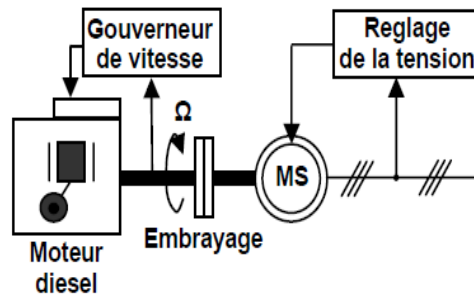
## 2.8. Principaux composants des systèmes hybrides

Les systèmes photovoltaïques et les éoliennes, les générateurs diesels sont souvent utilisés dans les SEH. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources et type d'énergie renouvelable et conventionnel. Les convertisseurs, les charges, les charges de délestage est une forme de gestion de l'énergie peuvent également faire partie d'un SEH. Les principaux composants des systèmes hybrides sont décrits comme suit :

### 2.8.1. Générateur diesel

Dans un SEH, le générateur classique est souvent connu par le moteur diesel qui est directement couplé au générateur synchrone comme le montre la figure 2.36. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur

constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré [2].



**Figure 2.36.** Conception d'un générateur diesel [2].

## 2.8.2. Systèmes de stockage

L'augmentation de la part de renouvelable dans la fourniture d'énergie nécessite la mise en œuvre de systèmes de stockage de cette énergie. La nature de stockage sera différente selon la durée à assurer. Le développement de moyens de stockage d'énergie performants et économiques est aussi indispensable pour diminuer la dépendance au pétrole extrêmement forte du secteur des transports.

Le stockage d'énergie a aussi un rôle à jouer pour accompagner une pénétration accrue du nucléaire. Les centrales doivent en effet être opérées de façon aussi continue que possible et le stockage en période creuse pourrait permettre d'éviter les centrales thermiques ou les turbines à gaz utilisées en période de pointe, avec les pollutions associées [32].

### 2.8.2.1. Différents modes de stockage

Le stockage de l'énergie électrique n'est pas possible directement. Il faut transformer l'énergie électrique en une énergie potentielle différente (mécanique, électrochimique...), elle-même stockable, puis disposer d'une seconde transformation pour la ramener sous sa forme primitive.

Les transformations technologiquement disponibles sont très nombreuses. Quelques exemples pour le stockage d'électricité [32] :

#### – Stockage électrochimique

Le stockage sous forme de batteries électrochimiques est la forme de stockage d'électricité la plus répandue. Si les batteries au plomb restent la solution de référence, de nombreux progrès ont été accomplis avec l'apparition des batteries alcalines (Nickel-métal Hydrure notamment), puis des batteries au lithium, et notamment Lithium-ion qui semble aujourd'hui prendre l'avantage dans la plupart des applications performantes. La technologie émergente des super-condensateurs offre des

puissances importantes, mais des capacités de stockage plus limitées que les batteries, et donc des temps de réponse courts.

#### – Stockage mécanique

Le stockage gravitaire consiste à pomper de l'eau en phase de stockage vers une retenue située en altitude, puis à récupérer l'énergie gravitaire hydraulique disponible à travers une turbine couplée un générateur située en contrebas. Ce type de stockage présente un bon rendement technique et économique et est de loin le plus utilisé dans le monde.

Le stockage par air comprimé consiste à comprimer et à stocker de l'air. Pour stocker un volume important, on peut utiliser un stockage souterrain, par exemple une cavité saline.

Le stockage inertiel fait appel à un volant d'inertie tournant à grande vitesse, pouvant atteindre 100000 tours/min, il délivre surtout de la puissance dans des temps courts.

#### – Stockage thermique

Le stockage de chaleur sous forme sensible consiste simplement à chauffer un liquide ou un solide en phase de stockage et à récupérer cette chaleur en phase de déstockage. Le stockage sous forme de matériaux à changement de phase permet de disposer de grandes quantités de chaleur à température fixe.

Le stockage de chaleur par transformation physicochimique fait appel à une transformation physico-chimique du milieu stocké dans l'enceinte par adsorption ou absorption réversible d'un liquide ou d'un gaz. Il permet de s'affranchir des pertes thermiques dans le temps.

Il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en trois catégories [33] :

- **Stockage court** : (de quelques heures à quelques jours), c'est le cas du rayonnement solaire, de l'énergie éolienne, l'énergie des vagues, l'énergie hydraulique au fil de l'eau, l'énergie marémotrice.
- **Stockage moyen** : (de quelques mois), c'est le cas des grands barrages hydrauliques, de l'énergie thermique des mers, des cultures annuelles à finalité énergétique.
- **Stockage long** : (une année et plus), c'est le cas de la biomasse forestière, la géothermie dans les nappes aquifères.

### 2.8.2.2. Batteries électrochimiques

Les accumulateurs électrochimiques de type batteries permettent de stocker des énergies électriques importantes (de quelques Wh à plusieurs MWh selon leur taille) sur des durées de quelques minutes à quelques mois. Ce sont des systèmes fermés capables d'effectuer, à la demande, la conversion réciproque de l'énergie chimique en énergie électrique. Cette conversion est effectuée avec un



rendement énergétique, variable selon les conditions d'utilisation, pouvant atteindre normalement, et parfois dépasser 80% [32].

### **2.8.2.3. Constitution**

Les accumulateurs se déchargent en convertissant l'énergie chimique contenue dans la batterie en énergie électrique. Ils se chargent en convertissant l'énergie électrique en énergie chimique et contrairement aux piles sont donc réversibles. Chaque élément de batterie comporte une quantité de matière dite masse active négative capable de fournir des électrons au circuit extérieur lors de la décharge, et une quantité de matière dite masse active positive capable d'accepter les électrons de retour vers l'accumulateur.

### **2.8.2.4. Différents types d'accumulateurs**

On y distingue les accumulateurs en milieu aqueux, acide ou alcalin, les accumulateurs « chauds » et les accumulateurs en milieu organique. Le milieu aqueux présente l'avantage d'une conductivité ionique élevée, surtout en milieu acide, mais le choix des masses actives est limité. Les milieux non aqueux permettent des tensions élémentaires plus élevée et l'utilisation de masses actives plus variées [32].

#### **a. Accumulateur à électrolyte aqueux**

L'électrolyte aqueux, acide ou alcalin, est un milieu relativement bon conducteur ionique, mais la tension d'un élément y est limitée par la décomposition éventuelle de l'eau en oxygène et/ou hydrogène provoqué par le caractère oxydant (ou réducteur) des masses actives.

##### **– Accumulateur plomb –acide sulfurique**

Il a été inventé par GASTON planté en 1858, comme un générateur de puissance, à une époque où l'électricité n'était produite que par des piles. À l'état chargé la concentration en acide est au maximum de conductivité. Bien chargé l'accumulateur au plomb est puissant, capable de fournir des courants importants. À l'état déchargé, la concentration en acide sulfurique est relativement faible, l'accumulateur est beaucoup moins puissant, surtout à froid.

Les différents constituants des matières actives, plomb, sulfate et peroxyde de plomb ont des densités très différentes, les matières actives gonflent à la décharge et dégonflent à la charge avec un risque de décohésion, ce qui nuit à la cyclabilité. Les collecteurs de courant sont en plomb, seul matériau économique capable de résister à la corrosion. La corrosion lente du collecteur positif est inévitable, c'est la cause normale de défaillance des batteries au plomb. Les batteries au plomb, dites étanches, sont apparus assez récemment sur le marché. Dans une batterie étanche, la négative est

surcapacitive, il n'y a pas de dégagement d'hydrogène (très peu), mais il y a formation d'oxygène à la positive lors de la surcharge [32].

#### *- Batteries alcalines*

Le développement des batteries alcalines est dû au Suédois WALDEMAR JUNGNER en 1990, qui a trouvé le moyen d'éviter la corrosion du collecteur positif. Le nickel est en effet le seul métal passivable en milieu alcalin par formation d'une couche d'oxy hydroxyde NiOOH parfaitement insoluble, mais conducteur électronique. La mousse de nickel constitue maintenant un des collecteurs les plus utilisés.

L'intérêt des batteries alcalines réside dans le fait que l'électrolyte n'est pas consommé, il est donc possible d'en mettre peu. D'autre part la solution aqueuse de potasse reste bon conducteur ionique jusqu'à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , un avantage décisif dans certains cas par rapport aux batteries au plomb qui ne descendent pas en dessous de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [32].

#### *- Accumulateur Ni-MH*

Sont construits principalement sous forme cylindrique spiralée, pour l'alimentation des appareils électroniques portables. Le coût de Ni-MH, supérieur à celui de Ni-Cd de même capacité reste un handicap pour les grosses capacités. Le remplacement du cadmium par un alliage métallique hydrurable (alliage métallique capable de stocker l'hydrogène, noté MH). L'accumulateur Ni-MH fonctionne de façon très similaire au Ni-Cd, il a une capacité massique et volumique supérieure [32].

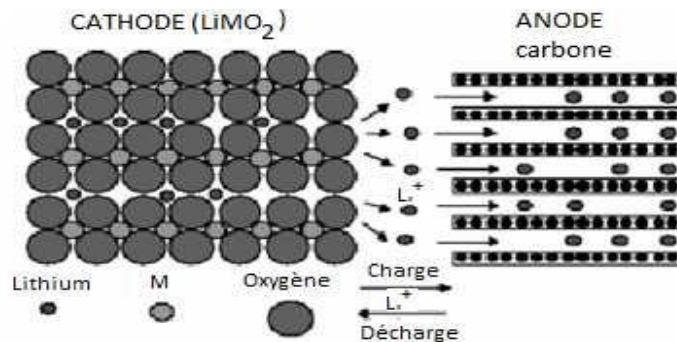
### ***b. Accumulateurs à électrolyte non aqueux***

L'utilisation de milieux non aqueux permet d'obtenir des tensions élémentaires supérieures à 2V, notamment en utilisant des masses actives négatives beaucoup plus réductrices que l'hydrogène comme le Lithium, matériau présentant à la fois un très grand potentiel électrochimique négatif et une grande légèreté.

#### *- Accumulateur Lithium-ion*

Les accumulateurs lithium-ion se différencient comme des accumulateurs lithium métal par le fait que l'électrode négative n'est pas constituée de lithium métal mais d'un composé d'insertion du lithium, typiquement du graphite. Ainsi, le lithium n'est théoriquement jamais sous forme métallique dans les accumulateurs Li-ion. Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité comme le montre la Figure 2.37. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode. L'électrode positive est constituée d'un oxyde du type  $\text{LiMO}_2$ . Actuellement, trois de ces oxydes sont utilisés dans ces batteries :  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  et  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Le séparateur est constitué d'une membrane polymère microporeuse et l'électrolyte est une solution de  $\text{LiPF}_6$  dans un mélange de solvants organiques.

Les accumulateurs Li-ion ont une densité d'énergie massique bien supérieure aux autres systèmes de l'ordre de 120 Wh/kg et 200 W/kg. Ils sont donc performants pour toutes les utilisations car ils stockent une grande quantité d'énergie pour une faible masse et un faible volume. Les avantages qui peuvent convenir par ce système : ils présentent une faible autodécharge, une cyclabilité élevée (>500 cycles), ils peuvent fonctionner à basse température typiquement jusqu'à  $-20^{\circ}\text{C}$ , et représentent un danger limité pour l'environnement contrairement aux batteries au plomb, malgré l'utilisation du cobalt qui se trouve en faible quantité. Ce type de batterie est sélectionné dans cette étude.



**Figure 2.37.** Schéma de principe de la batterie Li-Ion [33].

#### - Accumulateurs Lithium métallique

Le lithium métal est utilisé dans les piles qui sont les plus performantes en termes de durée de vie et de capacité stockée mais pour les accumulateurs, l'utilisation du lithium sous forme métallique présente des problèmes de cyclabilité dus au changement de sa structure lors des cycles de charge/décharge. De plus, il est très réactif vis-à-vis des électrolytes liquides utilisés entraînant des risques d'échauffements excessifs, des dégagements gazeux, voire même l'explosion de l'accumulateur. La technologie « *Lithium métallique* » est de moins en moins explorée du fait de problèmes de sécurité qu'elle engendre.

#### - Accumulateurs Lithium-polymère

Une nouvelle technologie d'accumulateurs Li-ion a vu le jour récemment sur le marché des accumulateurs, c'est les accumulateurs Lithium-polymère ou Li-ion polymère. Ces accumulateurs se procèdent de la technologie Li-ion par leur procédure de fabrication différent, mais reprennent la même technologie d'électrodes. Le remplacement de l'électrolyte liquide par un électrolyte solide a été considéré. Les risques de contacts directs anode/cathode sont ainsi éliminés et la matrice d'insertion en carbone peut être supprimée qui augmentant la quantité d'énergie de la batterie. Ces batteries sont par conséquent compactes et présentent une énergie massique grande de l'ordre de 150 Wh/kg. Le processus permet d'utiliser un emballage multicouche souple contrairement à la technologie classique qui demande un emballage rigide pour assurer la tenue mécanique de l'accumulateur. De plus, aucune

réaction chimique secondaire n'a lieu durant la charge, ce qui explique les rendements énergétiques très élevés (entre 90 et 100 %).

### 2.8.2.5. Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion

Durant la décharge, l'électrode négative est le siège de l'oxydation du lithium ( $\text{Li}_x\text{C}_6$ ) qui produit  $x$  ions de  $\text{Li}^+$  et  $x$  électrons. Les ions traversent l'électrolyte et vont à l'électrode positive où se produit la réduction d'un matériau par l'intercalation des ions  $\text{Li}^+$ . Ce type de matériaux présente la particularité d'accepter des ions lithium en modifiant éventuellement leur structure. Les électrons alimentent en énergie le circuit extérieur. Durant la charge, les ions  $\text{Li}^+$  effectuent le trajet inverse, les électrons étant fournis par le circuit extérieur comme montré la figure 2.38. La réaction générale d'un accumulateur Lithium-Ion à oxyde  $\text{LiNiO}_2$  est donnée à travers l'équation suivante :

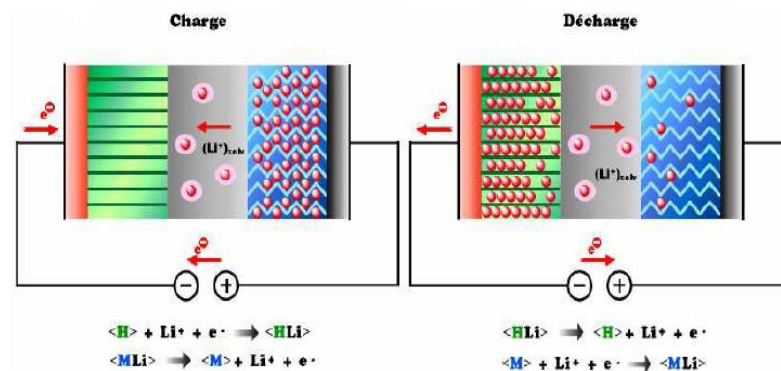


Figure 2.38. Fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion

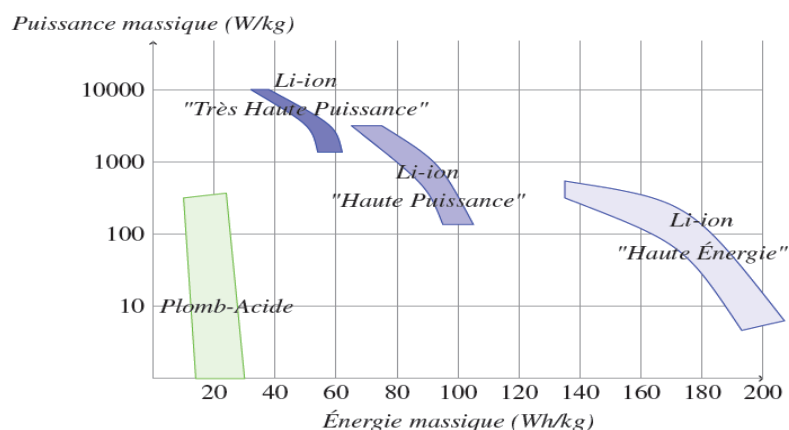
- **L'électrode positive :** Composée de structures en couches qui sont constituées d'un oxyde du type  $\text{LiMO}_2$  (M pour métal) pour les accumulateurs Lithium-Ion. Actuellement, trois oxydes sont utilisables :  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  et  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Vu le coût très élevé de l'oxyde de cobalt allié au lithium, seuls les deux autres oxydes sont utilisés. Pour une électrode positive composée de structures spinelles, on utilise des dérivés de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiMnO}_2$  et de  $\text{LiFeO}_2$ . Enfin, pour des accumulateurs lithium-métal ce sont l'oxyde de vanadium, l'oxyde de manganèse ou des polymères conducteurs qui sont utilisés.
- **L'électrode négative :** Achevée en composés carbonés : graphite, carbones hydrogénés, d'oxydes mixtes à base de titane. Elle sert de matériau d'insertion, elle n'est donc pas modifiée lors de la réaction.
- **Le séparateur :** Constitué d'une membrane polymère microporeuse qui reprend les mêmes propriétés que celles des accumulateurs au plomb.

- **L'électrolyte** : Une solution de  $\text{LiPF}_6$  dans un mélange de solvants organiques. Il se trouve soit sous forme liquide, soit sous forme solide (polymère sec, polymère gélifié ou composé organique vitreux). Sa nature fixe la tension maximale d'utilisation de l'accumulateur. Pour un polymère sec, la tension maximale ne peut excéder 3.5V, alors qu'elle peut atteindre 4.8V pour un liquide ou un gel. De plus, le transport des ions ne modifiant pas l'électrolyte, la résistance interne est pratiquement indépendante de l'état de charge et ne varie notablement qu'avec la température.

### 2.8.2.6. Contraintes d'utilisation de l'accumulateur au lithium

Les performances de cet accumulateur sont meilleures que celle d'un accumulateur au plomb. Mais son coût est beaucoup plus cher et sa mise en œuvre pose encore plusieurs problèmes, particulièrement pour exploiter la modularité. En effet, une surcharge peut causer un emballement thermique et une destruction de l'enceinte totalement étanche de l'accumulateur. Or le lithium étant effectivement très réactif avec l'eau, cette rupture peut avoir des conséquences catastrophiques (explosion). De plus, ces batteries supportent assez mal les surcharges, car la structure des électrodes peut être modifiée dans ce cas, et la création d'un dépôt de lithium risque de nuire à l'accumulateur. L'insertion du lithium se fait trop vite et de façon non réversible ce qui diminue la durée de vie de l'accumulateur. Le domaine de température d'utilisation dépend de la stabilité et de la conductivité de l'électrolyte typiquement autour de la température ambiante, souvent utilise des polymères secs car ils ont une conductivité suffisante autour de 60°C.

Le diagramme de RAGONE est un outil intéressant pour visualiser la zone d'utilisation en termes de puissance/énergie d'un système de stockage et pour comparer les différentes technologies. Lorsque les axes utilisent les mêmes échelles, le diagramme de RAGONE permet de visualiser les constantes de temps du système de stockage étudié. La figure 2.39 représente les zones d'utilisation des accumulateurs Li-ion et les accumulateurs Plomb-Acide qui apparaissent aussi sur ce diagramme [34].



**Figure 2.39.** Diagramme de RAGONE : Comparaison des technologies Li-ion et Plomb-Acide [35].

Sur la figure précédente inspirée de [36], les technologies "Haute Puissance" et "Haute Énergie" ont été distinguées pour les accumulateurs Li-ion. Il est possible de mesurer les gains en termes de puissance et d'énergie que peut apporter la technologie Lithium-ion. Pour le stockage dédié aux applications en site isolé, on s'intéressera surtout à la technologie "Haute Énergie". A l'heure actuelle, la technologie de stockage dominante dans les applications de production en site isolé d'énergie d'origine renouvelable est la technologie Plomb-Acide à cause de sa maturité technologique, et elle est la plus compétitive. Cependant, la technologie Li-ion commence à être envisagée comme un candidat crédible pour les applications "Haute Énergie" [37] et [38] notamment en raison des gains substantiels en termes de rendement et de durée de vie. Un certain nombre de centres de recherches, tels que l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) ou encore l'institut allemand FRAUHOFFER, travaillent sur l'évaluation de la technologie Lithium-ion comme moyen de stockage dans les applications autonome ou raccordées au réseau [39].

### 2.8.2.7. Caractéristiques d'une batterie

Chaque batterie électrochimique présente les caractéristiques suivantes [40] :

- **Résistance interne de l'accumulateur** : Elle peut être déterminée en fonction de ses composants à savoir : la résistance de l'électrolyte, la résistance de contact entre les électrodes et les cellules, et la résistance des matériaux propre à chacune des électrodes.
- **Tension à vide** : Lorsque la batterie est totalement chargée, la tension à vide équivaut environ à la tension idéale.
- **Tension nominale** : Elle indique la tension que la batterie doit recevoir pour qu'elle fonctionne correctement. Cette tension varie en fonction des différents types de batteries, puisqu'elle est déterminée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple oxydant/réducteur utilisé. Cette tension peut avoir une valeur de 6V, 12V, 24V, 48V, etc....
- **Tension de fin de décharge** : Cette tension détermine la tension une fois que la batterie est complètement déchargée. Elle représente la valeur minimale que la tension doit avoir pour ne pas endommager la batterie.
- **Capacité** : Elle représente l'énergie maximale que la batterie peut emmagasiner. Elle est proportionnelle à la dimension de la batterie, et est définie par :

$$C_{db} = \int_{t_0}^t I_b(t) dt \quad (2.6)$$

Son unité de mesure est l'ampère-heure (Ah).

- **Taux de décharge et de recharge** : Le taux de décharge correspond au temps que la batterie met pour se décharger dans son intégralité. Par exemple, si on a un courant de décharge de 10A et une batterie de 50Ah, le taux de décharge sera égal à 5A/h. On le notera alors C/5.
- **Profondeur de décharge** : Elle est exprimée en pourcentage, elle définit l'énergie maximale qui peut être dérivé de la batterie sans pour autant endommager, ce qui permet de ralentir au maximum sa durée de vie.
- **Influence des paramètres extérieurs** : La température influe sur le rendement de la batterie. Afin d'avoir un rendement optimal, la température idéale est de 25°.
- **Durée de vie et nombre de jour d'autonomie** : Le nombre de jour d'autonomie se détermine en laissant la batterie alimenter le réseau jusqu'à sa décharge, sans la recharger. La durée de vie correspond au nombre de cycle charge/décharge de la batterie.
- **Énergie** : Elle s'exprime généralement en joule, mais peut aussi s'exprimer en Watt/heure. Elle est définie par la relation suivante :

$$E = \int_{t_0}^t v_1(t) i_b(t) dt \quad (2.7)$$

- **État de charge de l'accumulateur** : L'état de charge de la batterie est généralement simplifié par l'acronyme SOC (state-of-charge), est une caractéristique très importante puisqu'elle nous donne le niveau de charge de la batterie en pourcentage. L'état de charge peut être déterminé par la capacité disponible et est exprimée en fonction de la capacité nominale comme suit :

$$\text{SOC} = \left( \frac{\text{Capacité disponible (Ah)}}{\text{Capacité nominale (Ah)}} \right) \times 100 \quad (2.8)$$

### 2.8.3. Convertisseurs d'électronique de puissance

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour effectuer des contrôles qui sont reliés à ces systèmes, comme par exemple charger les batteries de stockage et transformer le courant continu en courant alternatif et vice versa. Généralement, les convertisseurs les plus couramment utilisés avec les systèmes d'énergies renouvelables sont : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [16].

Les redresseurs effectuent la conversion CA/CC, d'où ils sont utilisés avec les systèmes de conversion des énergies renouvelables. Ce sont des instruments relativement simples, pas chers et à bon rendement. 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. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles,

mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctionnements de redresseur et de l'onduleur sont réalisés par un seul appareil. Les hacheurs permettent de faire la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources [2].

#### **2.8.4. Charge**

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Elles peuvent être de type résistif et inductif. La charge et l'équipement électrique, alimentée par le système, peuvent être alimentées en CC comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou en CA dans les cas d'usage domestique, nécessitant l'utilisation d'un onduleur.

### **2.9. Commande des systèmes hybrides**

Le problème primordial rencontré dans la commande des SEH est la possibilité de produire l'énergie requise par la charge, bien que les grandes variations de l'énergie fournie, dans le but de maintenir la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites admissibles. Les variations de la production des sources d'énergie renouvelables sont affectées par les variations météorologiques. Deux étapes très importantes et essentielles doivent être prises en considération pour effectuer la commande du SEH [2] :

- La stratégie d'opération, qui indique le déroulement de la gestion d'énergie pour plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système ;
- La qualité de l'énergie, qui permet de confirmer la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, etc.

### **2.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, des généralités sur le développement et l'utilisation des énergies renouvelables avec des données sur les productions mondiales de ces énergies et même en Algérie. Une étude descriptive sur les systèmes d'énergie hybrides combinant deux ou plusieurs systèmes de production d'énergie renouvelable ou non. Leurs configurations ainsi que leurs modes de connexion soit en mode isolé ou connecté au réseau ont été élucidés. Une présentation du système hybride considéré dans cette étude constituée d'un système PV, un système éolien et un système de stockage d'énergie par batterie d'accumulateurs a été exposé.

Dans le prochain chapitre, on abordera la modélisation du système d'énergie hybride (PV/éolien) en considérant le stockage d'énergie connecté au réseau électrique. L'utilisation de ces systèmes d'énergies implique d'appliquer des contrôles ou des commandes, d'où une démonstration de la commande appliquée pour chaque modèle du SEH.



## Modélisation et simulation des systèmes hybrides connectés au réseau

---

---

### 3.1. Introduction

En raison de la situation critique que connaissent les combustibles conventionnels à savoir le pétrole, le gaz et d'autres, le développement des sources d'énergie renouvelables s'améliore continuellement et sont devenues plus importantes de nos jours. Ceci est dû à leurs avantages comme la disponibilité abondante dans la nature, écologique et recyclable. Parmi ces sources renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne constituent les ressources énergétiques les plus dynamiques au monde. En l'absence d'émission de polluants, la conversion d'énergie se fait à travers le vent et les cellules photovoltaïques.

Dans les applications et la conception de systèmes, la modélisation et la simulation sont essentielles pour optimiser le contrôle et améliorer les opérations du système de puissance. Dans ce chapitre, les modèles des principaux composants du système hybride proposé sont développés et validés. Ce système comprend un système PV, un système d'éolienne, un système de stockage d'énergie à base de batteries, un convertisseur CC-CC et un convertisseur CC-CA.

### 3.2. Modélisation des systèmes hybrides

#### 3.2.1. Système photovoltaïque

De nombreux modèles du panneau PV existent dans la littérature. On présente dans ce qui suit, les différents modèles adoptés pour les composants du système PV.

##### 3.2.1.1. *Modèles du panneau PV*

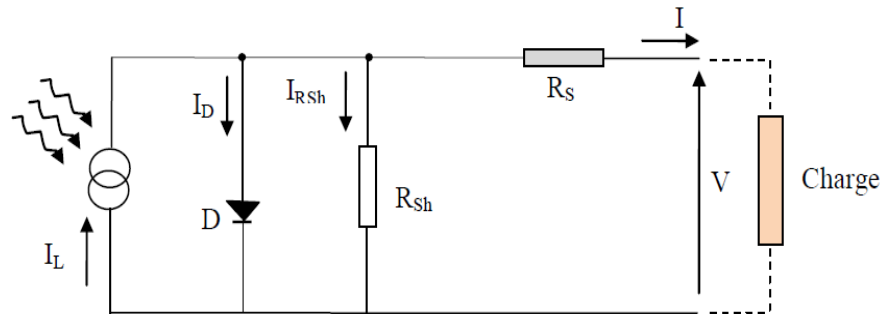
Une cellule PV est une source de puissance non linéaire. Le courant et la tension de sortie de ce composant dépendent à la fois de l'éclairement solaire et de la température. A cet effet, la prédiction des performances d'une cellule/module/générateur PV nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique permettant l'étude de son fonctionnement pour les différentes conditions

météorologiques (éclairage, température, etc.). De nombreux travaux portent sur le développement des modèles mathématiques pour la simulation de la caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule/module/générateur PV d'autres se sont orientés vers la modélisation des performances des modules PV en termes de puissance électrique produite [41].

Généralement, le circuit à une diode est décrit par une résistance shunt  $R_{sh}$  tenant compte du courant de fuite. Cependant, en cas où une précision plus grande est exigée, le modèle à deux diodes en parallèle est souvent utilisé. Les deux modèles comportent : une source de courant  $I_{ph}$  résultant du flux lumineux, de diodes simples décrivant les phénomènes de polarisation de la cellule et une résistance  $R_s$  pour représenter les pertes. L'introduction de la résistance shunt à la sortie des deux circuits n'est généralement pas prise en considération afin de réduire le nombre d'inconnues à quatre au maximum. Pendant l'obscurité, si la cellule solaire est reliée à une grande tension externe, elle produit un courant appelé courant de l'obscurité  $I_d$  total [42].

### a. Modèle à une diode

Le modèle à une diode a été utilisé dans plusieurs travaux de recherche relatifs à la modélisation du système PV pour l'obtention de ses caractéristiques. Le schéma électrique équivalent de ce modèle est illustré dans la figure 3.1 [41] :



**Figure 3.1.** Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

D'après le circuit électrique équivalent, le courant et la tension du panneau PV peuvent être décrits comme suit [19] :

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{mV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (3.2)$$

Avec :  $I_L$  courant de photo-généré,  $I_0$  courant de saturation,  $q$  charge de l'électron,  $k$  constante de BOLTZMANN,  $m$  facteur d'idéalité relatif au module,  $T_c$  température de jonction de la diode.

### b. Modèle à cinq paramètres

Ce modèle est basé sur le calcul des cinq paramètres de la fonction  $I = f(I, V)$  selon l'équation (3.1)

à savoir :  $I_L, I_0, R_s, R_{sh}$  et  $m$ . Ces paramètres sont déterminés à partir des données:

- le courant de court-circuit  $I_{sc}$ ,
- la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ ,
- le courant  $I_m$
- la tension  $V_m$  au point de puissance maximale  $P_m$  et les pentes au voisinage de  $V_{oc}$  et de  $I_{sc}$  [43].

Les équations obtenues sont définies comme suit :

$$R_{s0} = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V=V_{oc}} \quad (3.3)$$

$$R_{sh0} = - \frac{dV}{dI} \Big|_{I=I_{sc}} \quad (3.4)$$

$$R_s = \frac{R_{s0} \left( \frac{V_{oc}}{mV_t} - 1 \right) + R_{sh0} \left( 1 - \frac{I_{sc} R_{s0}}{mV_t} \right)}{\frac{V_{oc} - I_{sc} R_{sh0}}{mV_t}} \quad (3.5)$$

$$R_p = R_{sh0} - R_s \quad (3.6)$$

$$m = \frac{V_m + I_m R_s - V_{oc}}{V_t \log \left[ \frac{I_{sc} - I_m \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - \frac{V_m}{R_p}}{I_{sc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - \frac{V_{oc}}{R_p}} \right]} \quad (3.7)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \frac{V_{oc}}{R_p}}{\exp \left( \frac{V_{oc}}{mV_t} \right)} \quad (3.8)$$

$$I_L = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{oc}}{mV_t} \right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (3.9)$$

### c. Modèle à quatre paramètres

Le modèle à quatre paramètres suit celui à cinq paramètres en faisant tendre  $R_{sh}$  vers l'infini. Les paramètres du modèle sont donc :  $I_L, I_0, R_s$  et  $m$ . Leurs expressions sont données par [19] :

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{mV_t}\right) - 1 \right] \quad (3.10)$$

$$I_L = I_{sc} \quad (3.11)$$

On pose :  $A = \frac{1}{mV_t}$

$$A = \frac{\left[ \frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{MP}} + \log\left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{sc}}\right) \right]}{2V_{MP} - V_{oc}} \quad (3.12)$$

$$R_s = \frac{\frac{1}{A} \log\left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{sc}}\right) + V_{oc} + V_{MP}}{I_{MP}} \quad (3.13)$$

$$I_0 = I_{sc} \exp(-AV_{oc}) \quad (3.14)$$

$$m = \frac{1}{AV_t} \quad (3.15)$$

#### d. Modèle explicite

Ce modèle nécessite les données de quatre paramètres à savoir : le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant maximal  $I_m$  et la tension maximale  $V_m$ . La relation, liant le courant  $I$  avec la tension  $V$ , est donnée par [19,44] :

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left( \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \quad (3.16)$$

Avec :

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \quad (3.17)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\log\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)} \quad (3.18)$$

#### e. Modèle simplifié

Le modèle simplifié considère [45-46] :

- La résistance  $R_{sh}$  est très grande :  $V_{oc}/R_{sh} \ll I_{sc}$  ;
- Le courant de photo-généré  $I_L$  et le courant de court-circuit  $I_{sc}$  sont égaux ;

$$- \exp\left(\frac{V + IR_s}{mV_t}\right) \gg 1 ;$$

$$- m = \text{constante} (1 < m < 1,3).$$

- La condition du circuit ouvert :

$$I_0 = I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right) \quad (3.19)$$

- L'équation de la caractéristique I-V est donnée par :

$$I = I_{sc} \left[ 1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t}\right) \right] \quad (3.20)$$

Avec :

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \log(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (3.21)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = FF_0 (1 - r_s) \quad (3.22)$$

$$r_s = R_s \left( \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \right) \quad (3.23)$$

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{mV_t} \quad (3.24)$$

### f. Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est similaire à celui du modèle à une diode comme montré dans la figure 3.1. La seule différence consiste à ajouter une deuxième diode en parallèle afin de rendre le modèle plus représentatif. La caractéristique I-V de ce circuit est donnée par [19] :

$$I = I_L - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_1 V_t}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_2 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.25)$$

Les paramètres de ce modèle peuvent être déterminés par les expressions suivantes [46] :

$$I_L = I_{sc} \quad (3.26)$$

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_L}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right)} \quad (3.27)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_L}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right)} \quad (3.28)$$

Avec :  $m_1 = 1$  et  $m_2 = 2$

$R_s$  est obtenue en dérivant l'équation (3.25) au point  $V = V_{0C}$  :

$$R_s = - \left[ \frac{dv}{dI_{(V=V_{0C})}} + \frac{1}{\left( X_{1v} + X_{2v} + \frac{1}{R_{sh}} \right)} \right] \quad (3.29)$$

$$X_{1v} = \frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qV_{0C}}{kT}\right) \quad (3.30)$$

$$X_{2v} = \frac{qI_{02}}{2kT} \exp\left(\frac{qV_{0C}}{2kT}\right) \quad (3.31)$$

En négligeant  $1/R_{sh}$  devant  $(X_{1v} + X_{2v})$ , on obtient la relation suivante :

$$R_s = - \left[ \frac{dv}{dI_{(V=V_{0C})}} + \frac{1}{(X_{1v} + X_{2v})} \right] \quad (3.32)$$

$R_{sh}$  est obtenue à partir de l'équation (3.29) pour  $I = I_{sc}$  :

$$R_{sh} = - \frac{1}{\left[ \frac{1}{\left( \frac{dv}{dI_{(I=I_{sc})}} + R_s \right)} + X_{1i} + X_{2i} \right]} \quad (3.33)$$

$$X_{1i} = \frac{I_{01}}{V_t} \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_t}\right) \quad (3.34)$$

$$X_{2i} = \frac{I_{02}}{2V_t} \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{2V_t}\right) \quad (3.35)$$

Le système PV utilisé dans cette étude est modélisé suivant le premier modèle du circuit équivalent indiqué dans la figure 3.1, et la démonstration des équations mathématique de ce modèle est donnée par les formules suivantes [47] :

$$I = I_L - I_D - I_{Rsh} \quad (3.36)$$

Où :

$I$  est le courant de charge,  $I_D$  courant de diode,  $I_{Rsh}$  courant de fuite d'une cellule PV.

Le courant traversant la diode peut être donnée par la relation suivante :

$$I_D = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{mkT}\right] - 1 \right\} \quad (3.37)$$

En outre :

$$I_{R_{sh}} = (V + IR_s) / R_{sh} \quad (3.38)$$

L'équation (3.36) peut être écrite par :

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp[q(V + IR_s) / mKT] - 1 \right\} - (V + IR_s) / R_{sh} \quad (3.39)$$

$$V = V_D - IR_s \quad (3.40)$$

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.41)$$

$$V_T = K \times T / q \times m \times N_{cell} \times N_{ser} \quad (3.42)$$

Où :

$N_{cell}$  est le nombre de cellules connectées en série par module,

$N_{ser}$  est le nombre de modules connectés en série par chaîne (string).

### 3.2.1.2. Méthode d'optimisation de la puissance

Une cellule PV présente des caractéristiques de sortie non linéaires et variant fortement selon l'irradiation et la température. Ceci se traduit par un point de puissance maximal qui dérive selon ces deux paramètres. La poursuite du MPPT permet d'atteindre ce point.

Les différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale sont plus ou moins robustes, nécessitent plus ou moins de mesures et se heurtent généralement à la présence de plusieurs coudes de maximums locaux dans le cas de modes dégradés ou de dérive paramétriques d'un ensemble de panneaux interconnectés. Le principe général est assimilable à une recherche d'un extremum dans une caractéristique présentant des coudes de dérivée nulle, si la puissance mesurée est  $P$ , un déplacement  $\Delta P$  dans la courbe pour une variation  $\Delta I$  dans le plan puissance courant  $(P, I)$  doit assurer à chaque instant la relation :  $Signe(\Delta P) \cdot Signe(\Delta I) < 0$ . Il est à noter que l'on peut également avoir le même raisonnement dans le plan tension, puissance  $(P, V)$  [14].

Le système photovoltaïque achevé dans ce travail est connecté à un hacheur boost, une méthode d'optimisation a été appliquée sur ce convertisseur pour extraire le point de puissance maximale (MPPT) comme indiqué sur la figure 3.2. Ou une description de la méthode d'MPPT choisi sera détaillée par la suite.

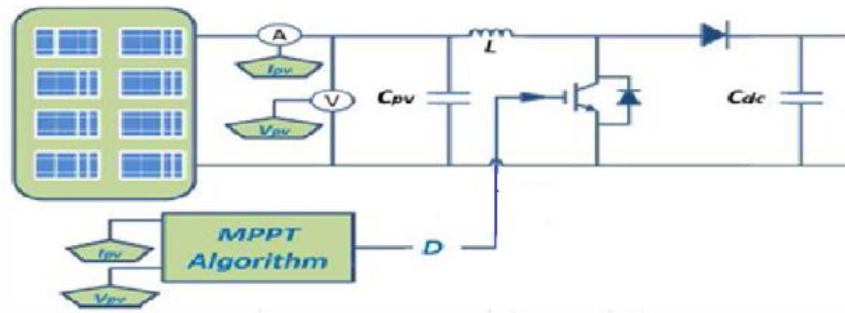


Figure 3.2. Modèle d'un système photovoltaïque.

La puissance extraite du module PV est estimée en multipliant les mesures du courant  $I$  et de la tension  $V$ . Ces mesures du courant et de la tension sont évaluées à travers d'implanter diverses méthodes tel- que : Perturbation et Observation (P&O), Incrémental Inductance, technique intelligente...etc. et avec d'autre méthode heuristique. On s'intéresse dans ce travail sur la méthode Incrémentale Inductance pour trouver le point de puissance maximale (MPPT).

#### a. Méthode d'incrémentation de conductance

Dans cet algorithme, la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension  $V$  et sa différence  $dV$  et du courant  $I$  et sa différence  $dI$ . Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au  $MPP$ , positive à gauche et négative à droite :

$$\begin{aligned} dP/dV &= 0 \quad \text{Au MPP} \\ dP/dV &> 0 \quad \text{À gauche du MPP} \\ dP/dV &< 0 \quad \text{À droite du MPP} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Puisque :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.44)$$

L'expression (3.43) peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta V} &= \frac{-I}{V} \quad \text{Au MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &> \frac{-I}{V} \quad \text{À gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &< \frac{-I}{V} \quad \text{À droite du MPP} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Cette méthode démontre que le  $MPP$  peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ( $G_{ci} = I/V$ ) à l'incrémentation de la conductance ( $\Delta G_{ci} = \Delta I / \Delta V$ ), comme le montre l'organigramme de la figure 3.3.  $V_{réf}$  est la tension de référence pour laquelle le panneau PV est forcé



à fonctionner. Au  $MPP$ ,  $V_{réf} = V_{MPP}$ , une fois que le  $MPP$  est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans  $\Delta I$  est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du  $MPP$ . L'algorithme augmente ou diminue  $V_{réf}$  pour suivre le nouveau  $MPP$ .

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du  $MPP$ . Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au  $MPP$  et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du  $MPP$  dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le  $MPP$  dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sur le courant de court-circuit  $I_{sc}$ . Ces deux solutions assurent que le vrai  $MPP$  est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux.

Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur [48] :

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (3.46)$$

D'après l'expression (3.45), l'erreur est nulle au  $MPP$ . Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

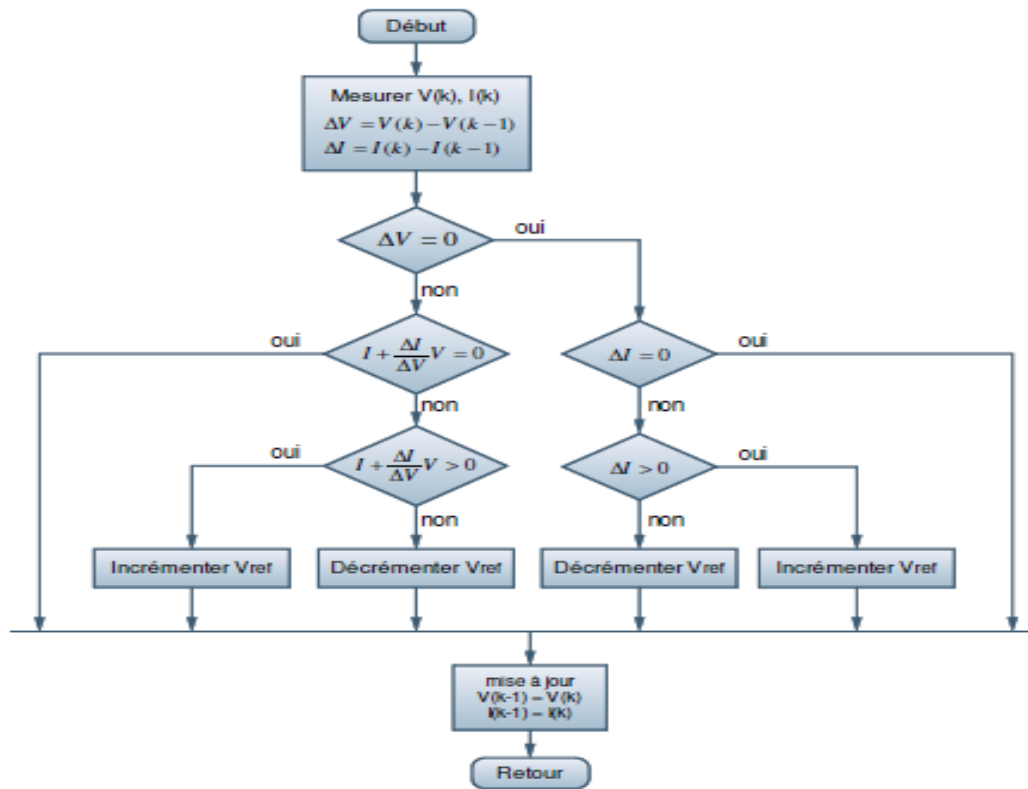


Figure 3.3. Organigramme de la méthode IncCond.

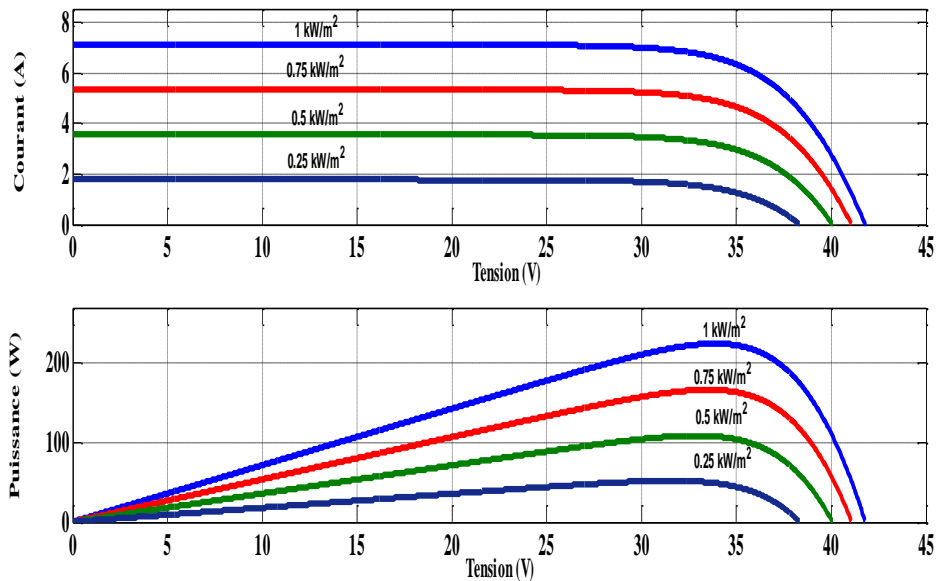
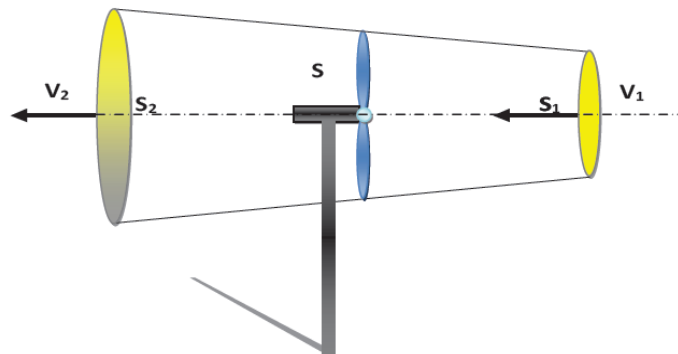


Figure 3.4. Caractéristiques  $I - V$ ,  $P - V$  du module photovoltaïque (à 25°C).

### 3.2.2. Système éolien

Dans cette partie, une démonstration mathématique sera expliquée le modèle éolien qui représente la turbine et la génératrice. D’après la définition du système éolien, une conversion de l’énergie cinétique disponible dans le vent sera transformée en énergie mécanique puis électrique. Cette conversion peut conduire à déterminer la puissance de sortie de ce système comme été définie dans le théorème de

BETZ, qui a considéré selon la figure 3.5 un tube du courant d'air autour d'une éolienne à axe horizontal où  $V_1$  et  $V_2$  représentent respectivement les vitesses du vent en amont et en aval de l'aérogénérateur [49].



**Figure 3.5.** Tube du courant autour d'une éolienne.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne  $V_{moy}$  entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ , soit :

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.47)$$

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant ce tube de la surface  $S$  des pales en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne :

$$m = \rho S V_m = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.48)$$

La puissance réelle  $P_{mt}$  extraite par le rotor des pales s'exprime par [17] :

$$P_{mt} = m \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (3.49)$$

En remplaçant  $m$  par son expression ; on obtient :

$$P_{mt} = \rho S \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (3.50)$$

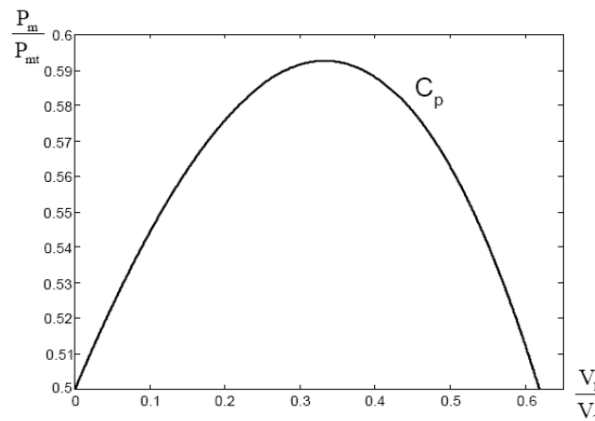
La puissance totale  $P_t$ , théoriquement disponible sur cette même surface  $S$  est extraite sans diminution de vitesse du vent soit à la vitesse  $V_1$ , est donnée par [49,50] :

$$P_t = \rho S \frac{V_1^3}{2} \quad (3.51)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est appelé coefficient de puissance  $C_p$  [15], [51] :

$$C_p = \frac{P_{mt}}{P_t} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (3.52)$$

La figure 3.6 représente le changement du ratio  $\frac{P_{mt}}{P_t}$  en fonction de  $\frac{V_1}{V_2}$ . On s'aperçoit que ce ratio est nommé coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27 = 0.59$ . Cette borne appelée borne de BETZ qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est déterminée par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  qui montre le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [52].



**Figure 3.6.** Caractéristique du coefficient de puissance.

La figure 3.6 représente la forme la plus répandue du coefficient de puissance et caractérise une éolienne tripale à axe horizontal. Cette forme peut changer selon le type de l'éolien (à axe horizontal ou vertical), ou bien selon le nombre des pales comme le montre la figure 3.7 pour des éoliennes dont la vitesse relative est comprise entre 0 et 10. Ces dernières sont appelées des éoliennes lentes. La courbe  $C_p = f(\lambda)$  a une forme cloche plutôt étroite et pointue. Alors que pour des éoliennes rapides et dont la vitesse relative est comprise entre 10 et 20, la forme de cette courbe est plutôt large et aplatis au sommet.

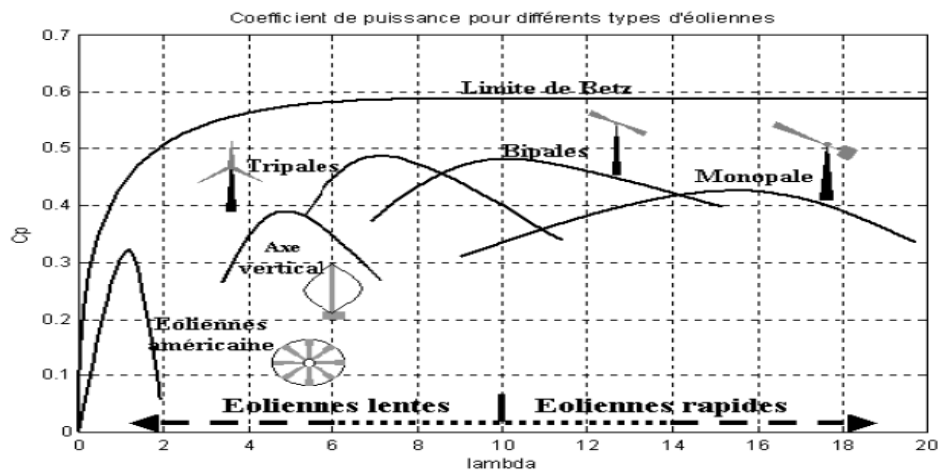


Figure 3.7. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Le coefficient  $C_p$  étant variable, et est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega$ , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle de calage. Mais il est généralement représenté en fonction d'une vitesse  $\lambda$ , appelée vitesse spécifique représentant le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité des pales de la turbine  $\Omega R_t$  et la vitesse instantanée du vent, la figure 3.8 clarifié ces relations, et donné la formule suivante [49] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (3.53)$$

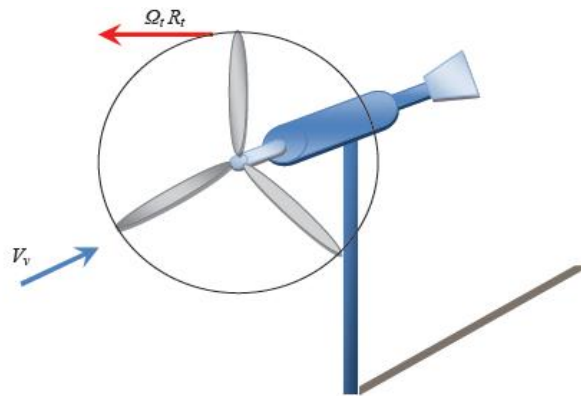


Figure 3.8. Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle ( $\Omega_t R_t$ ).

Avec  $R_t$  : Rayon de la surface balayée en (m),  $\Omega$ , la vitesse de rotation des pales de la turbine en (rad/s) et  $V$  la vitesse du vent en (m/s).

Les meilleures turbines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ, on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [50] :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p_{\max}} \quad (3.54)$$

Où  $C_{p_{\max}}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse du vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{t-nom}$ .

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} \frac{1}{2} C_p = (\lambda) \rho S V_1^3 \frac{1}{2} C_p = (\lambda) \rho \pi R_t^2 V_1^3 \quad (3.55)$$

Où :

$$S = \pi R_t^2 \quad (3.56)$$

Et le couple de la turbine éolienne  $C_{aer}$  donner par la relation suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V_1} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} (\lambda) \rho \pi R_t^3 V_1^2 \quad (3.57)$$

Le coefficient du couple est décrit par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{aer}}{\frac{1}{2} \rho S R_t V_1^2} \quad (3.58)$$

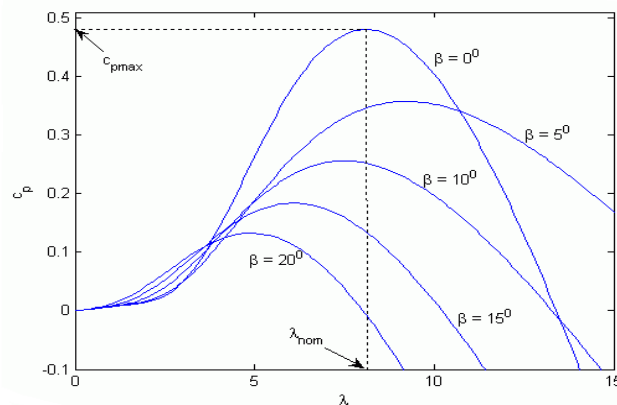
Pour montrer la caractéristique du coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$ , une équation générale est donnée par l'expression suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 (c_2 / \lambda_i - c_3 \beta - c_4) e^{-c_5 / \lambda_i} + c_6 \lambda \quad (3.59)$$

Où :

$$1/\lambda_i = 1/\lambda + 0.08\beta - 0.035/\beta^3 - 1 \quad (3.60)$$

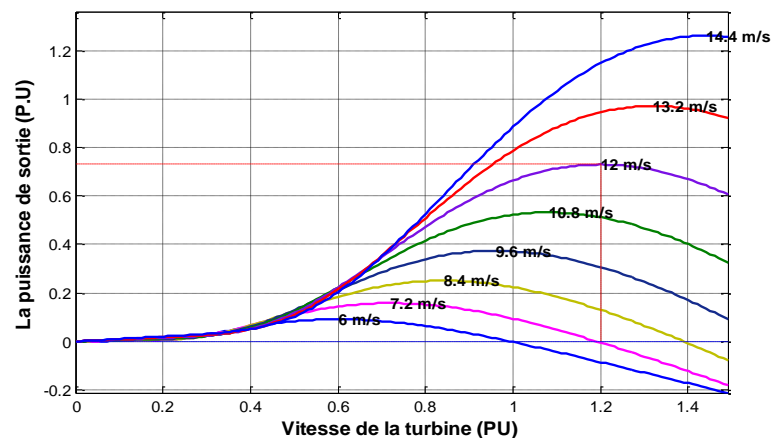
Les coefficients  $c_1$  jusqu'à  $c_6$  sont :  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ,  $c_6 = 0.0068$ .



**Figure 3.9.** Coefficient de puissance ( $C_p$ ).

La figure 3.9 représente le coefficient de puissance  $C_p$  calculé à partir de l'équation  $C_p(\lambda, \beta)$  en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta_i$ . On peut noter que si pour un angle constant  $\beta_i$ , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant et égal à  $\lambda_{optimal}$  à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. Et montre aussi le  $\lambda_{optimal}$  correspondant à un angle d'inclinaison des pales  $\beta_i$ . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir  $\lambda = \lambda_{optimal}$ , il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur et de l'éolienne avec les variations de vitesse du vent comme été mentionné dans l'équation (3.53).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient  $\lambda$  varie avec la vitesse du vent, la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement). Par contre, le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse de rotation fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [13].



**Figure 3.10.** Caractéristique de la puissance de sortie de la turbine (avec  $\beta=0$ ).

- Pour le modèle de la turbine, elle a des variables d'entrées et de sorties comme : la vitesse du vent, la vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage. Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes.
- Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse du générateur plus élevée, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur d'une valeur moins que le précédent, selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (3.61)$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (3.62)$$

Notons qu'on a éliminé le multiplicateur grâce au MSAP, alors la valeur de  $G$  est égale à l'unité.

– L'arbre de transmission est modélisé selon l'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor [53] :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (3.63)$$

Avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (3.64)$$

$J$  : L'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur, comprenant l'inertie de la turbine, du générateur des deux arbres et du multiplicateur.

$f$  : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor, est définie par la relation suivante :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (3.65)$$

Où :

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (3.66)$$

$C_{mec}$  : Le couple électromagnétique développé par le générateur,  $C_g$  : Le couple issu du multiplicateur,  $C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements.

### 3.2.2.1. Méthodes de contrôle au niveau de la turbine

Il existe essentiellement deux méthodes de contrôle. Elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais l'une d'elles peut également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine [14] :

#### a. Contrôle par décrochage aérodynamique passif (Passive Stall)

L'angle de calage  $\beta$  est fixe. L'angle  $\alpha$  augmente naturellement avec la vitesse du vent incident si la vitesse de rotation est pratiquement constante. Cette augmentation provoque une augmentation de la



trainée et un décrochage progressif de la pale. Le couple est maintenu à peu près constant jusqu'au décrochage total et accroissement rapide ou il chute rapidement. La puissance est donc limitée.

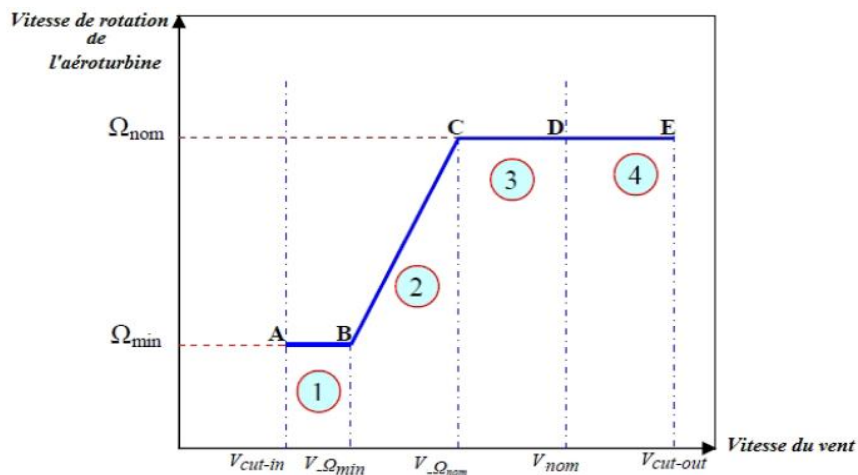
### **b. Contrôle par angle de calage variable (pitch Control)**

L'angle  $\alpha$  peut être diminué (ou augmenté) fortement par rotation des pales par des actionneurs, hydrauliques ou électriques donc par augmentation (ou diminution) de l'angle de calage  $\beta$  variant généralement de 20 à 30°. Les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales sont donc réduites. Le couple peut être maintenu pratiquement constant et peut être annulé par des pales ( $\beta = 90^\circ$ ). La puissance peut donc être limitée ainsi à la valeur nominale.

#### **3.2.2.2. Commande de la turbine éolienne**

Il existe deux types de commande de la turbine à vitesse variables :

- **Stratégie d'optimisation de puissance** : Dans ce cas, l'énergie capturée est optimisée au-dessous de la vitesse nominale du vent, comme mentionné dans la figure 3.11 par les séquences « A-B, B-C, C-D ».
- **Stratégie de limitation de puissance** : L'objectif de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine au-dessus de la vitesse nominale du vent, comme montré dans la séquence « D-E ».



**Figure 3.11.** Caractéristiques de la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent.

Selon la figure 3.11, on distingue qu'il existe quatre zones de fonctionnement :

- **Zone1 « A-B »** : L'éolienne débute à fonctionner à la vitesse du vent  $V_{cut-in}$ , et une vitesse de rotation  $\Omega_{t-min}$ .
- **Zone2 « B-C »** : Quand la vitesse de la génératrice est entre les valeurs des vitesses  $\Omega_{min}$  et  $\Omega_{nom}$ , un algorithme de commande est utilisé pour extraire la puissance maximale du vent. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant.

- **Zone3 « C-D »** : Cette partie de séquence montre que la vitesse de rotation nominale est atteinte, alors que la puissance générée arrive à des valeurs importantes mais inférieures à la puissance nominale.
- **Zone4 « D-E »** : Cette zone exprime l'arrivée à la puissance nominale, un système d'orientation des pales « pitch control » est appliqué afin de limiter la puissance générée.

Le contrôle de la turbine est affirmé par deux boucles de régulation, qui sont [54] :

- Boucle de régulation de vitesse.
- Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la première stratégie où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la deuxième stratégie, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale  $\beta_{opt}$ , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent, la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la lenteur du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone 3.

Le modèle étudié pour le système éolien est choisi selon le modèle de BETZ, ou une modélisation mathématique a été détaillée comme cité précédemment. D'après la définition du système éolien qui conduit à convertir l'énergie mécanique en électrique, on peut déduire que la puissance de sortie du ce système est décrite selon l'équation (3.51). Un contrôle a été appliqué sur le système éolien dont le but d'extraire le point de puissance maximale.

### 3.2.2.3. *Technique d'extraction du point de puissance maximale*

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche [55]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale correspond à la recherche de la vitesse de rotation optimale. La figure 3.10 illustre la caractéristique du système éolien dans le plan puissance et vitesse de rotation de la turbine, et chaque courbe est en ligne pointillée avec la vitesse du vent  $V_v$ . L'ensemble des sommets de cette caractéristique donne les points optimaux recherchés qui définit une courbe de puissance optimale, et la puissance de sortie optimale est représentée par subséquente équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (3.67)$$

Une commande doit être appliquée sur le système éolien dont le but d'extraire le point de puissance maximale (*MPPT*) indiqué par la zone 2 selon la figure 3.11. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches qui sont :

- L'approche classique, qui ne considère que la caractéristique  $C_p = f(\lambda)$  qui n'est pas connue [55].
- La deuxième approche, la plus répandue, suppose que la caractéristique  $C_p = f(\lambda)$  est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

On trouve deux méthodes connues et plus fréquemment utilisées pour optimiser la puissance maximale d'un système éolien :

- Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.
- Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.

Dans le présent travail, la méthode d'MPPT est appliquée sur le système éolien et qui se présente comme suit :

La puissance optimale du système éolien peut être calculée par l'expression [56] :

$$P_{m\_opt} = 0.5 A C_{p\_opt} \left( \frac{\Omega_{opt} R}{\lambda_{opt}} \right)^3 = K_{opt} (\Omega_{m\_opt})^3 \quad (3.68)$$

$$K_{opt} = 0.5 \rho A C_{p\_opt} \left( \frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (3.69)$$

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v_w = K_w v_w \quad (3.70)$$

Par conséquent, le couple optimum peut être déterminé par :

$$T_{m\_opt} = K_{opt} \Omega_{m\_opt}^2 \quad (3.71)$$

La figure 3.12 représente un système éolien connecté à un redresseur triphasé qui permet de convertir CA en CC, puis relié à un hacheur dévolteur où un contrôle est appliqué au sein de l'interrupteur dont le but d'extraire le point de la puissance maximale.

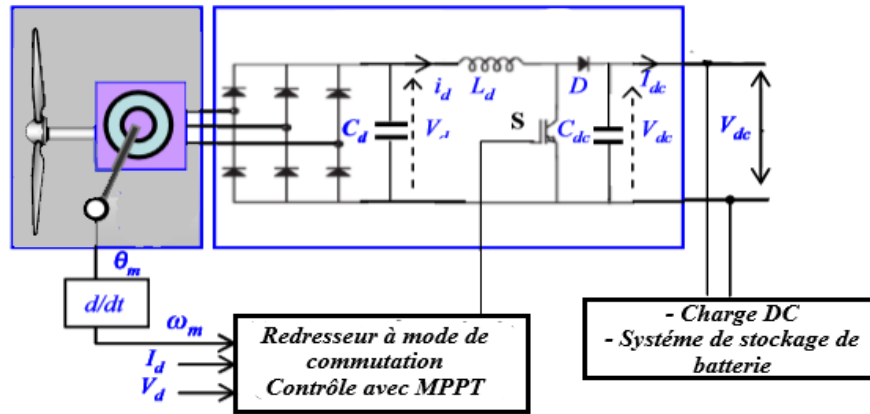


Figure 3.12. Schéma de structure de contrôle du système éolien.

Le contrôle d’MPPT proposé est mentionné dans la figure 3.13. Il permet de contrôler le rapport cyclique de l’interrupteur (S) du convertisseur et d’extraire la puissance maximale qui dépend de la variation de la vitesse du vent de l’éolienne. L’algorithme de commande comprend les étapes suivantes :

- Mesurer la vitesse du générateur ( $\omega_m$ ) ;
- Calculer le couple de référence, à travers l’expression suivante :

$$T_g^* = K_{opt} \Omega_g^2 \tag{3.72}$$

- Déterminer le courant de référence continu par l’utilisation de l’équation suivante :

$$I_d^* = \frac{(T_g^* \Omega_g)}{V_d} \tag{3.73}$$

– Enfin, l’erreur entre le courant de référence et le courant continu mesuré est utilisée pour faire varier le rapport cyclique du commutateur afin de réguler la sortie du redresseur en mode de commutation et le couple du générateur via un régulateur PI.

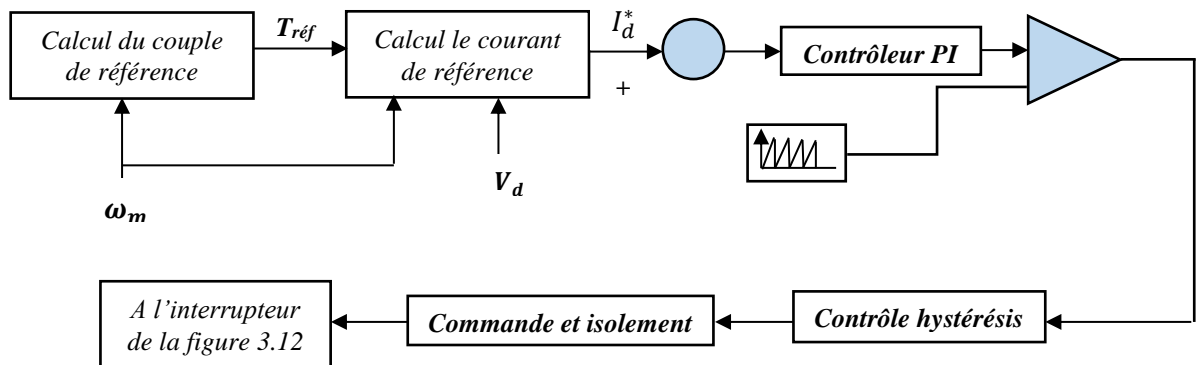


Figure 3.13 Contrôle d’MPPT appliqué au convertisseur

### **3.2.2.4. Modèle de générateur éolien**

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute énergie électrique. On s'est intéressé beaucoup plus dans cette étude sur le générateur synchrone à aimant permanent (MSAP) pour produire de l'électricité. Ce choix de type de générateur est conçu sur les avantages techniques et économiques qu'elle offre la MSAP par rapport aux autres machines. Une MSAP n'a pas de circuit extérieur pour l'excitation. Sa taille peut être réduite par l'utilisation d'un pas polaire plus faible. L'absence d'amortisseur provoque quelques problèmes de stabilité en cas de surcharge ou de transitoires. Sa modélisation reste très simple [14].

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine, cet avantage a couvert le coût élevé des aimants [57]. L'avantage le plus important de ces machines dans la production éoliennes est l'absence de multiplicateur de vitesse, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système.

#### **a. Composition d'une MSAP**

La machine synchrone triphasée inclut un stator fixe et un rotor qui tourne autour de l'axe de symétrie de cette machine. Dans les encoches est régulièrement distribuées sur la surface interne du stator sont logés trois enroulements identiques à  $p$  paires de pôles, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à  $2\pi/3$ . La composition du rotor est effectuée par un enroulement monophasé excité en courant continu, ou par un aimant permanent. La roue est conçue soit à pôles lisses ou à pôles saillants.

#### **b. Principe de fonctionnement**

L'inducteur de la génératrice synchrone entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induit qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celles du champ inducteur [58].

#### **c. Avantages de la MSAP**

Les avantages qui présentent la MSAP comparaison à autre machine comme la machine asynchrone et la machine à courant continu sont cités comme suit [52] :

- Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu ;
- Augmentation de la constante de temps thermique et de la fiabilité grâce à l'élimination des bagues et des balais ;

- Facteur de puissance et rendement plus élevés par rapport à la machine asynchrone ;
- Utilisation d'aimants permanents au rotor permet d'éliminer les pertes électriques dans le circuit rotorique ;
- Elle possède un couple moteur élevé au démarrage ce qui permet d'éliminer le multiplicateur de vitesse pour les systèmes éoliens.

#### **d. Modélisation de la MSAP**

Le modèle mathématique de l'MSAP obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau ;
- L'effet d'encoche est négligeable ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Une démonstration mathématique sera détaillée la modélisation de la MSAP en déterminant leur équation électrique et magnétique.

##### **– Equations électriques**

La tension statorique est donnée par la relation suivante :

$$[U_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] \quad (3.74)$$

Où :  $[U_s]$ ,  $[I_s]$  et  $[\psi_s]$  sont les : tensions, courants et flux triphasés du stator.

La tension rotorique peut être écrite comme suit :

$$[U_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}[\psi_f] \quad (3.75)$$

Où :  $[U_f]$ ,  $[I_f]$  et  $[\psi_f]$  sont les : tension, courant et flux du rotor.

##### **– Equations magnétiques**

Le flux statorique est décrit selon la formule suivante :

$$[\psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f] \quad (3.76)$$

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}] \quad (3.77)$$

Avec

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix}$$

et :

$$[L_{s2}] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos2(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos2(\theta) & \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Le flux rotorique est déterminé par l'expression :

$$[\psi_f] = [L_f][I_f] + [M_{fs}][I_s] \quad (3.78)$$

Où :

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos2(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$[M_{sf}]$  : Est la matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

Les équations électriques deviennent :

$$\begin{aligned} [U_s] &= [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[L_{ss}][I_f][I_s] + [L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f] \\ [u_f] &= [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}[M_{fs}][I_f][I_s] + [L_{ss}][I_s] + [L_f][I_f] \end{aligned} \quad (3.79)$$

### - Transformation de Park

La transformation de PARK permet de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a, b, c) en axes orthogonaux (d, q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statorique (a, b, c) par des bobinages équivalents (d, q). La transformation de Park est représentée par l'expression suivante :

$$[p(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

La matrice  $[p(\theta)]^{-1}$  est donnée par la relation suivante :

$$[p(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Les relations suivantes décrivent le passage du système triphasé au système (d, q) lié au rotor :

$$\begin{aligned} [U_a U_b U_c] &= [p(\theta)][U_d U_q] \\ [I_a I_b I_c] &= [p(\theta)][I_d I_q] \\ [\psi_a \psi_b \psi_c] &= [p(\theta)][\psi_d \psi_q] \end{aligned} \quad (3.82)$$

En appliquant la transformation au système, on obtient la relation suivante :

$$\begin{aligned} [U_{sdq}] [p(\theta)] &= [R_s] [p(\theta)] [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [p(\theta)] [I_s] + [M_{sf}] [I_f]) \\ [U_f] &= [R_f] [I_f] + \frac{d}{dt} ([M_{fs}] [p(\theta)] [I_s] + [L_f] [I_f]) \end{aligned} \quad (3.83)$$

Dans le moteur synchrone à aimants permanents, le flux engendré par les aimants est constant. Le modèle de ce moteur s'obtient donc en posant  $I_f$  constant, nous obtenons alors les équations suivantes :

#### - Équations magnétiques

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \Phi_F \\ \psi_q &= l_q i_q \\ \psi_s &= L i_s + \begin{bmatrix} \Phi_F \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.84)$$

#### - Équations électriques

$$\begin{aligned} U_d &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - w_{\psi_{sq}} \\ U_q &= R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} - w_{\psi_{sd}} \end{aligned} \quad (3.85)$$

On obtient sous forme matricielle la relation suivante :

$$U_s = R_s i_s + \psi'_s - w_m J \psi_s \quad (3.86)$$

Avec :  $u_s = [U_d U_q]^T$ ,  $i_s = [I_d I_q]^T$ ,  $\psi_s = [\psi_d \psi_q]^T$ ,  $w_m = \theta'_m$ , et  $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ .

En remplaçant l'équation (3.77) pour les expressions des flux, on obtient :

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + L_d \frac{d}{dt} I_{sd} - w L_q I_{sq} \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + L_q \frac{d}{dt} I_{sq} + w \psi L_d I_{sd} + w \Phi_f \end{aligned} \quad (3.87)$$

Finalement, on obtient l'expression suivante selon l'axe  $dq$  :

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_F \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

#### - Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être exprimé par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} P (L_d - L_q) I_d I_q + \phi_F I_q \quad (3.89)$$



Ce couple se décompose en deux couples selon les relations ci-dessous:

– **Le couple principal**

$$C_{ep} = p \cdot \phi_f \cdot I_q \quad (3.90)$$

– **Le couple de reluctance variable**

$$C_{er} = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) \quad (3.91)$$

L'équation du mouvement de la machine synchrone à aimant permanent est exprimée par :

$$J \frac{d}{dt} \Omega + F \cdot \Omega = c_{em} - c_r \quad (3.92)$$

– **Équations d'état de la MSAP**

Afin de trouver une résolution analytique et numérique pour le système d'équations du modèle, on peut écrire les équations électriques sous formes d'état, en rassemblant les équations des courants, on obtient le système d'état suivant :

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F\Omega \\ \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{V_{ds}}{L_d} - \frac{R_s i_{ds}}{L_d} + \omega_r L_q \frac{i_{qs}}{L_d} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{V_{qs}}{L_q} - \frac{R_s i_{qs}}{L_q} - \omega_r L_d \frac{i_{ds}}{L_q} + \frac{\omega_r}{L_q} \Phi_e \\ C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} + \Phi_e i_{qs}] \end{cases} \quad (3.93)$$

### 3.2.3. Système de stockage d'énergie

Face au problème de la carence d'énergie des sources d'énergie renouvelables, des différents types de solutions techniques ont été offerts. Le système de stockage d'énergie est considéré comme une meilleure solution. Ce type de stockage d'énergie peut équilibrer l'intermittence de l'alimentation, qui est causée par les sources d'énergie renouvelable, ou par une erreur de fonctionnement, une panne imprévue, défaillances de composants...etc. [59]. La combinaison d'un système de stockage d'énergie peut contenir des avantages comme réguler la fréquence et la tension dans les réseaux électriques, décrit la clé de la pénétration de l'énergie renouvelable telle-que les systèmes photovoltaïques et l'éolienne connectée au réseau électrique. Il offrir non seulement une solution technique au gestionnaire du réseau pour assurer en temps réel l'équilibre production consommation mais il permet également d'utiliser au mieux les ressources éoliennes ou solaires en évitant un délestage en cas de surproduction [60].

Le mode de stockage d'énergie électrique privilégié et utilisé actuellement l'accumulateur comme les batteries qui sont très largement répandues et qu'ils ont utilisés et appliqués dans cette

étude. La technologie est basée sur le concept chimique de pile. 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.

### 3.2.3.1. Modélisation de la batterie

Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. A la base on a trois types de modèles de batteries rapportés dans la littérature, à savoir : le modèle expérimental, électrochimique et le modèle électrique. Les deux premiers ne représentent pas bien les propriétés dynamiques nécessaires pour l'estimation de l'état de charge des éléments de la batterie contrairement au modèle électrique qui représente très bien ces caractéristiques électriques [59].

#### a. Modèle de batterie de SHEPHERD

Le modèle électrique le plus simple comporte une source de tension idéale en série avec une résistance interne. Néanmoins il ne prend pas en compte l'état de charge de la batterie. La résistance est supposée constante durant les cycles de charge et de décharge, et elle ne varie pas avec la magnitude du courant.

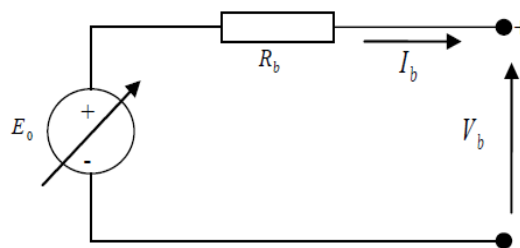


Figure 3.14. Modèle simple de la batterie.

La tension de la batterie est exprimée par la relation suivante :

$$E = E_0 - \frac{V_p C_{db}}{C_{db} - \int i_b dt} + \tilde{A} \exp(-B_t \int i_b dt) \quad (3.94)$$

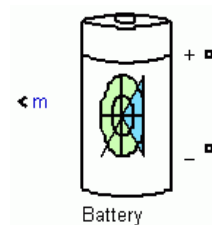
Avec :  $E_0$  est la tension constante de la batterie en (V),  $V_p$  est la tension de polarisation en (V),  $C_{db}$  est la capacité de la batterie en (Ah),  $i_b$  est le courant de la batterie en (A),  $\tilde{A}$  est la zone de l'amplitude exponentielle en (V),  $B_t$  est la zone exponentielle d'un temps inverse constant en (Ah<sup>-1</sup>).

SHEPHERD a développé une équation qui décrit le comportement électrochimique de la batterie en termes de tension maximale, tension de circuit ouvert, résistance interne, courant de décharge et état de charge de la batterie. Ce modèle représente très bien la décharge autant que la charge et utilise

seulement l'état de charge de la batterie comme variable d'état afin de représenter la variation de la tension [61].

Le modèle mathématique du système de stockage d'énergie par batterie d'accumulateur est basé sur le modèle de SHEPHERD. Ou un circuit équivalent été tracé conduit à modéliser le modèle électrique de la batterie, et selon ce modèle, la tension de sortie de la batterie est exprimée par l'équation (3.94).

Le modèle de la batterie a été réalisé dans l'environnement Matlab/Simulink/Sim power system à travers un bloc disponible sous Simulink présenté dans la figure 3.15, où tous les paramètres de ce block et du circuit équivalent peuvent être identifiés dépend du type de batterie, en tenant compte de la caractéristique de décharge de la batterie avec un courant nominal, qui sera démontrer et expliquer dans la section suivante.



**Figure 3.15.** Block de batterie sous Matlab/Simulink.

Ce block présente un modèle générique et dynamique servant à représenter les batteries les plus couramment utilisées (Plomb-acide, Lithium-Ion, Nickel-cadmium, et Nickel-Métal-Hydrure). Les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont supposés être les mêmes pour la charge, ils sont extraits de la fiche de données utilisée d'un fabricant.

Un certain nombre d'hypothèses sont concernés le modèle de la « batterie » à travers le Simulink [62] :

- La résistance interne est supposée être constante pendant la charge et les cycles de décharge, et ne varie pas avec l'amplitude du courant ;
- Les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont supposés être les mêmes pendant la charge ;
- La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant ;
- La température n'affecte pas le comportement du modèle ;
- L'autodécharge de la batterie n'est pas représentée. Elle peut être représentée par l'ajout d'une grande résistance en parallèle aux bornes de la batterie.

Les limites de ce modèle de batterie, seront définies comme suit :

- La tension minimale à vide de la batterie est de 0 V et la tension maximale n'a pas de valeur limite ;
- La capacité minimale de la batterie est de 0 Ah et la capacité maximale n'est pas limitée. Ainsi, le "SOC" (State Of Charge, niveau de charge) maximal peut être supérieur à 100% si la batterie est surchargée.

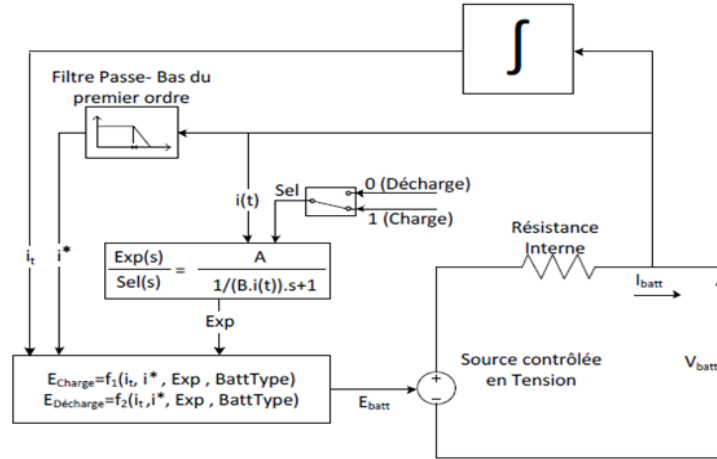


Figure 3.16. Circuit équivalent de la batterie.

**b. Modèle de décharge**

Le modèle de décharge proposé est similaire à celui de SHEPHERD, mais il peut représenter avec exactitude les dynamiques de la tension lorsque le courant varie, il prend aussi en compte la tension de circuit ouvert en tant que fonction de l'état de charge de la batterie. Un terme représentant la polarisation de la tension est ajouté afin de mieux représenter le comportement de la tension de circuit ouvert et le terme représentant la résistance de polarisation est légèrement modifié. La tension de la batterie obtenue est la suivante :

$$V_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} (it + i^*) + A \cdot \exp(-B \cdot it) \tag{3.95}$$

Où :  $i, i^*$  sont les courants de batterie et filtré en (A).

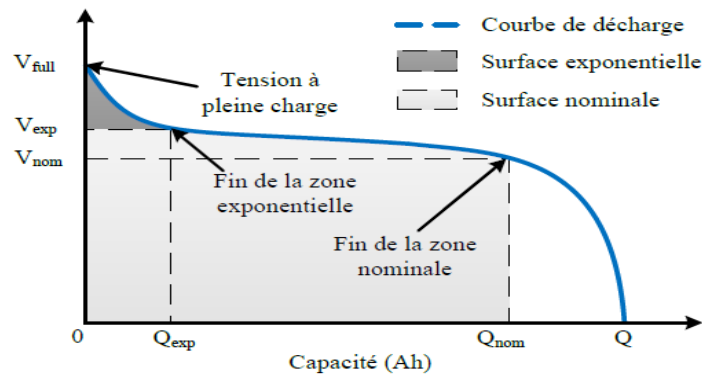
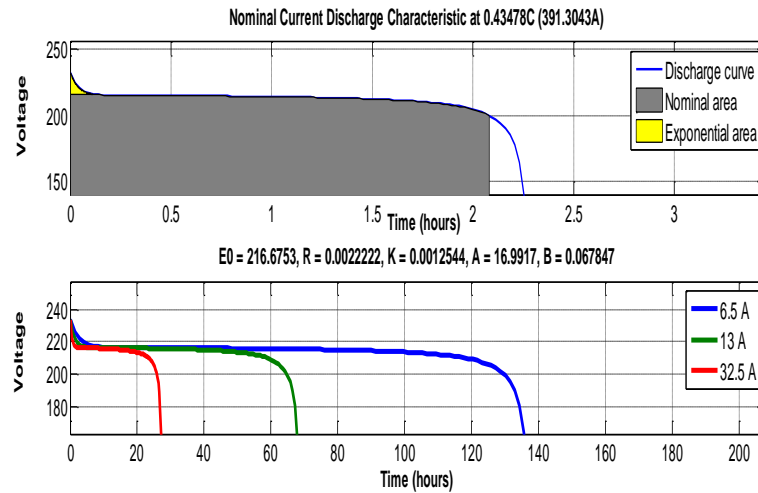


Figure 3.17. Courbe de décharge d'une batterie.

D'après la figure 3.17, la courbe de décharge de la batterie divise en trois sections. La première partie représente la chute exponentielle de tension lorsque la batterie est chargée. Selon le type de batterie, cette zone est plus ou moins large. La seconde section détermine la charge qui peut être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension soit inférieure à la tension nominale de la batterie. La dernière section présente la décharge totale de la batterie, lorsque la tension chute rapidement.

La courbe typique de décharge de la batterie de type Li-ion utilisé dans cette modélisation est démontrée dans la figure 3.18.



**Figure 3.18.** Caractéristique de décharge de la batterie Li-ion.

### c. Modèle de charge

Le modèle de charge est exprimé par la formule suivante :

$$V_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.96)$$

#### 3.2.3.2. Commande de la batterie

Tous les systèmes de puissance doivent avoir une stratégie de commande afin de décrire les interactions entre ses composants. L'utilisation de batteries pour le stockage implique la présence d'un régulateur [63]. Le système de stockage d'énergie étudié est connecté à un hacheur réversible en courant à travers un bus continu, dont le but de contrôler l'état de charge et de décharge d'énergie.

##### a. Hacheur réversible en courant

Ce type d'hacheur est utilisé pour adapter la tension aux bornes du système hybride (PV/éolien). Aussi le transfert d'énergie été effectué dans un seul sens, de la source (générateur PV +éolien) vers le bus continu. Ce convertisseur est constitué d'un hacheur survolteur et d'autre dévolteur qui ont associé

dans un seul hacheur comme montre la figure 3.19. Qui permet le transfert d'énergie dans les deux sens, ou le courant électrique circule de façon réversible.

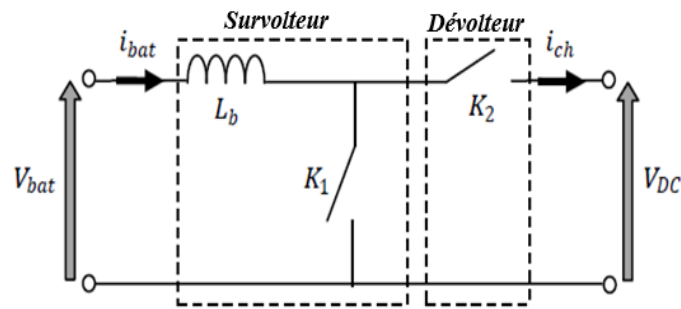


Figure 3.19. Hacheur réversible en courant.

L'objectif principal d'utiliser ce convertisseur avec la batterie est de maintenir la tension du bus continue constante. Dans ce cas, il n'est pas important de vérifier l'état de charge ou décharge de la batterie car la tension de bus continue peut-être stable et minimise les ondulations de tension du condensateur. Lors de la charge, l'interrupteur  $S_1$  est activé et le convertisseur fonctionne comme un Boost (survolteur). Autrement, dans le cas de décharge, l'interrupteur  $S_2$  est activé et le convertisseur fonctionne comme un Buck (dévolteur). La figure 3.20 représente le contrôle qui a été appliqué sur le hacheur bidirectionnel [64], et qui contient deux boucles de contrôle, l'une concerne sur le contrôle de tension, et l'autre sur le contrôle de courant. Lorsque la tension du bus continue est inférieure à la tension de la référence, l'interrupteur  $S_2$  est activé et vice versa pour l'interrupteur  $S_1$ .

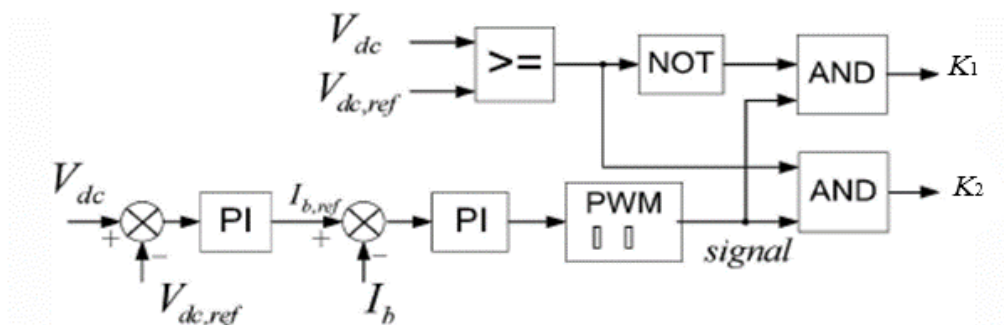
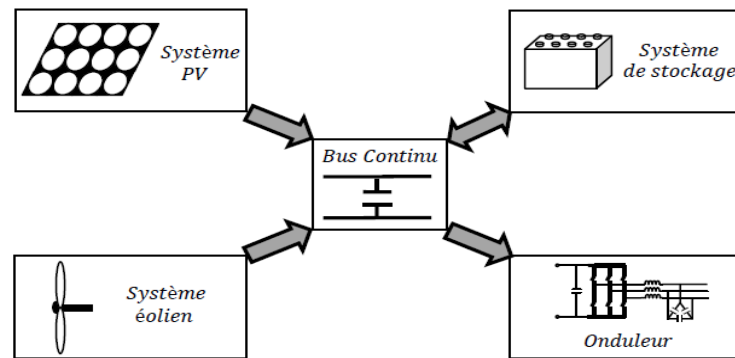


Figure 3.20. Contrôle du hacheur bidirectionnel.

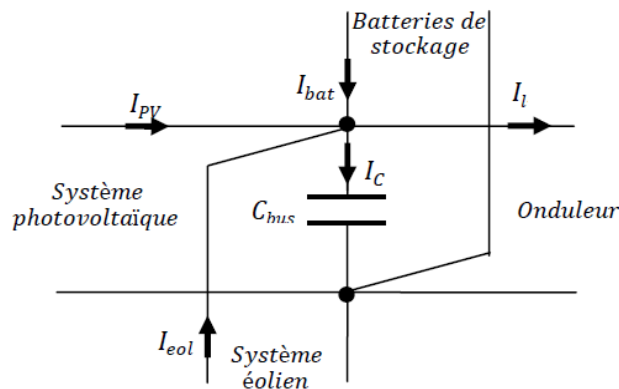
### 3.2.4. Bus Continu

Le couplage du système hybride constitué un système photovoltaïque et un système éolien, aussi un banc de batteries est effectué par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre la figure 3.21. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.



**Figure 3.21.** Couplage des systèmes hybrides (PV/éolien/batterie) par le bus continu.

La configuration du bus continu est montrée dans la figure 3.22. Il est représenté par un condensateur  $C_{bus}$  où sont connectés tous les bus continus des convertisseurs de l'électronique de puissance intégré dans le système hybride. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur [65].



**Figure 3.22.** Modèle du bus continu.

Les courants dans le bus continu agissent directement sur la valeur de la tension du bus  $V_{DC}$ . A partir de cette figure, on peut déduire le courant continu selon l'équation suivante :

$$I_C = I_{PV} + I_{eol} + I_{bat} - I_l \quad (3.97)$$

La tension  $V_{DC}$  est en fonction du courant  $I_C$ . Ils sont donnés par :

$$I_C = C_{bus} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (3.98)$$

$$V_{DC} = V_{DC0}^h + \frac{1}{C_{bus}} \int_{t1}^{t2} I_C dt \quad (3.99)$$

Le système d'énergie hybride étudié est connecté avec le système de stockage d'énergie à travers un bus continu, où ce dernier est lié à un onduleur pour la conversion du courant continu en courant alternatif, pour puisse être relié au réseau électrique. Un filtre  $RL$  été connecté à la sortie de l'onduleur qui permet d'éliminer les harmoniques engendrés à cause de la commutation.

### 3.2.5. Onduleur

L'onduleur permet de transformer le courant continu en courant alternatif avec une fréquence connue. C'est un dispositif électronique statique. Dans leur principe, les structures de ces convertisseurs continu-alternatif sont naturellement réversibles en puissance instantanée, donc en puissance moyenne, autorisant ainsi des marches en onduleur, lorsque la source continue fournit une puissance moyenne non nulle à la source alternative mais aussi au redresseur dans le cas contraire. Ils sont utilisés en électrotechnique pour [65] :

- Soit produire des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables. C'est le cas des onduleurs qui permettent d'alimenter des moteurs à CA vis-à-vis tourné à une vitesse variable comme (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. C'est le cas, en particulier, des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance. L'énergie stockée dans les batteries est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

#### 3.2.5.1. Types d'onduleurs

On trouve qu'il existe deux catégories d'onduleurs qu'on peut utiliser pour effectuer la conversion en alternatif. Elle se subdivise soit en autonome ou non autonome.

##### *a. Onduleur autonome*

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou autre semi-conducteur, dans ce cas nous commandons la fréquence de la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

- Les onduleurs autonomes de tension alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs autonomes de courant alimentés par une source de courant continu.

Pour les onduleurs de tension, ils sont catégorisés en deux types :

- Les onduleurs monophasés : Composés en pont et en demi-pont, qui permettent d'alimenter des charges alternatives monophasées de faible puissance.
- Les onduleurs triphasés : Ils couvrent la gamme de moyenne et de forte puissance. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [66], ce type d'onduleur été utilisé dans cette étude.

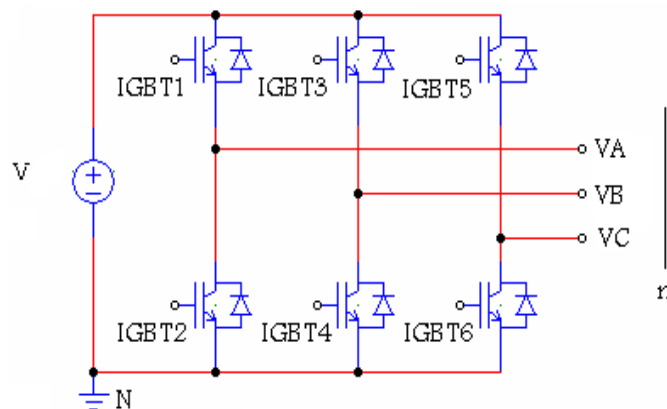


### b. Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur, tous les thyristors (pont de GRAËTZ) qui en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO [66].

#### 3.2.5.2. Modélisation d'un onduleur

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est défini par son circuit de puissance comme montré dans la figure 3.23. On doit distinguer d'une part les tensions de branche  $V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V$  des systèmes hybrides, d'autre part, il y a les tensions de phases  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  mesurées par rapport à un point neutre flottant  $n$  représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples, on peut les tirer facilement leurs tensions composées  $V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}$ .



**Figure 3.23.** Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure précédente, il est noté que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit :

$$\begin{aligned} V_{AN} &= S_1 \cdot V \\ V_{BN} &= S_2 \cdot V \\ V_{CN} &= S_3 \cdot V \end{aligned} \quad (3.100)$$

Où :

$S_1, S_2, S_3$  désignent les états des interrupteurs des phases  $A, B$  et  $C$  respectivement.

Les tensions composées sont :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{aN} + V_{Nb} = V_{aN} - V_{bN} = (S_1 - S_2) V \\ V_{bc} &= V_{bN} + V_{Nc} = V_{bN} - V_{cN} = (S_2 - S_3) V \\ V_{ca} &= V_{cN} + V_{Na} = V_{cN} - V_{aN} = (S_3 - S_1) V \end{aligned} \quad (3.101)$$

On peut écrire l'équation (3.101) sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot S \\ S &= \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.102)$$

Les tensions simples sont :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot S \quad (3.103)$$

### 3.2.6. Contrôle du réseau électrique

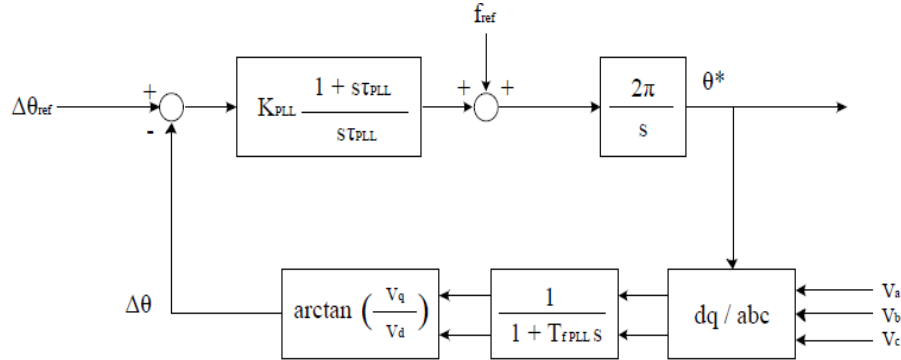
Pour pouvoir connecter un système au réseau, la tension de sortie de l'onduleur doit avoir la même fréquence que celle du réseau pour chacune des trois phases. Ceci peut se faire en déterminant l'angle de phase de la tension à partir d'une mesure directe du réseau [67].

Parmi les méthodes envisageables, on trouve qu'ils existent deux fréquemment utilisés. La première méthode consiste à filtrer la tension mesurée, l'inconvénient de cette méthode est qu'elle génère un déphasage non négligeable, qui est d'autant plus important que la fréquence de coupure du filtre passe bas est faible. La seconde est basée sur la détection du passage par zéro de la tension, ce qui permet de déduire la période et de reconstruire un signal sinusoïdal unitaire. Ce procédé est plus performant que le précédent, cependant il n'est pas optimum par exemple lors d'un saut de phase [68].

Le contrôle appliqué dans cette étude entre l'onduleur et le réseau est à base de PLL (Phase Locked Loop), elle produit un signal de sortie qui synchronise en phase et en fréquence le signal d'entrée en utilisant une boucle de régulation. Le processus de synchronisation se fait en temps réel ce qui amène la boucle à fonctionner constamment [67].

**3.2.6.1. Principe de base de la PLL**

Le principe de la PLL est basé sur l'orientation de la tension du réseau suivant l'axe d, ceci revient à annuler l'angle entre la composante de la tension d'axe direct et la tension mesurée ce qui entraîne l'annulation de la composante en quadrature, comme le montre la figure 3.24.



**Figure 3.24.** Boucle de Contrôle de la PLL.

Puisque la valeur de  $V_q$  est faible, le terme  $\arctan\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \approx \frac{V_q}{V_d}$  se comporte linéairement et  $\frac{V_q}{V_d} \approx \Delta\theta$ . Ainsi, la PLL peut être considérée comme une commande linéaire pour des fins de modélisation. Pour avoir le vecteur de la tension aligné sur l'axe direct on pose  $\Delta\theta_{ref} = 0$ . Si l'angle de la tension est supérieur à l'angle de l'axe d, la vitesse angulaire du repère d-q doit être augmentée. Une fréquence d'anticipation  $f_{ref}$  (*feed forward frequency*) de 50 Hz est utilisée pour réduire le temps de réponse de la PLL.

Dans le cas d'un système équilibré, les tensions du système triphasé sont écrites ainsi [69] :

$$\begin{aligned}
 V_1(t) &= V_m \cdot \sin(\theta) \\
 V_2(t) &= V_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
 V_3(t) &= V_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.104}$$

On applique une transformation inverse de park sur les tensions triphasées du réseau, la composante d'axe  $q$  générée par cette transformation est asservie à zero par action sur l'angle du repère de park.

La transformée de park a le rôle de comparateur de phase. Cette PLL a pour avantage de pouvoir également mesurer la fréquence du signal d'entrée. La figure 3.25 démontre le diagramme du fonctionnement de la PLL triphasée. En régime permanent, lorsque la PLL est « accrochée », on obtient  $(\theta = \theta'), \delta = 0$  et  $v_{qr} = 0$ , alors on a  $v_{dr} = V_r$ .

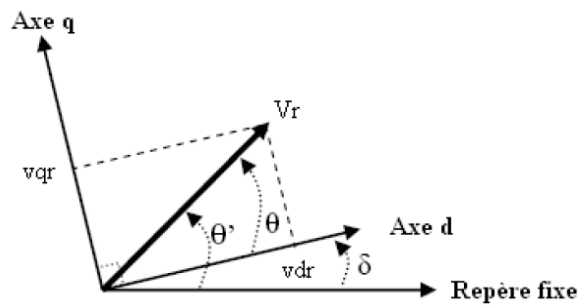


Figure 3.25. Fonctionnement de la PLL [69].

### 3.2.6.2. Synchronisation du réseau électrique

Le système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) est relié à un bus continu qui est connecté à un hacheur bidirectionnel CC/CC. Pour l'obtention du courant alternatif, un onduleur CC/CA est nécessaire et il doit être connecté avec le bus continu. Un filtre RL est ensuite lié à la sortie de l'onduleur, ce dernier a été contrôlé par la commande d'hystérésis. Dont un contrôle de PLL (*Phase Locked Loop*) est appliqué entre l'onduleur et le réseau dont le but d'assurer la synchronisation du réseau. La figure 3.26 montre la modélisation réalisée du système hybride (PV/éolien/batterie) raccordé au réseau implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink.

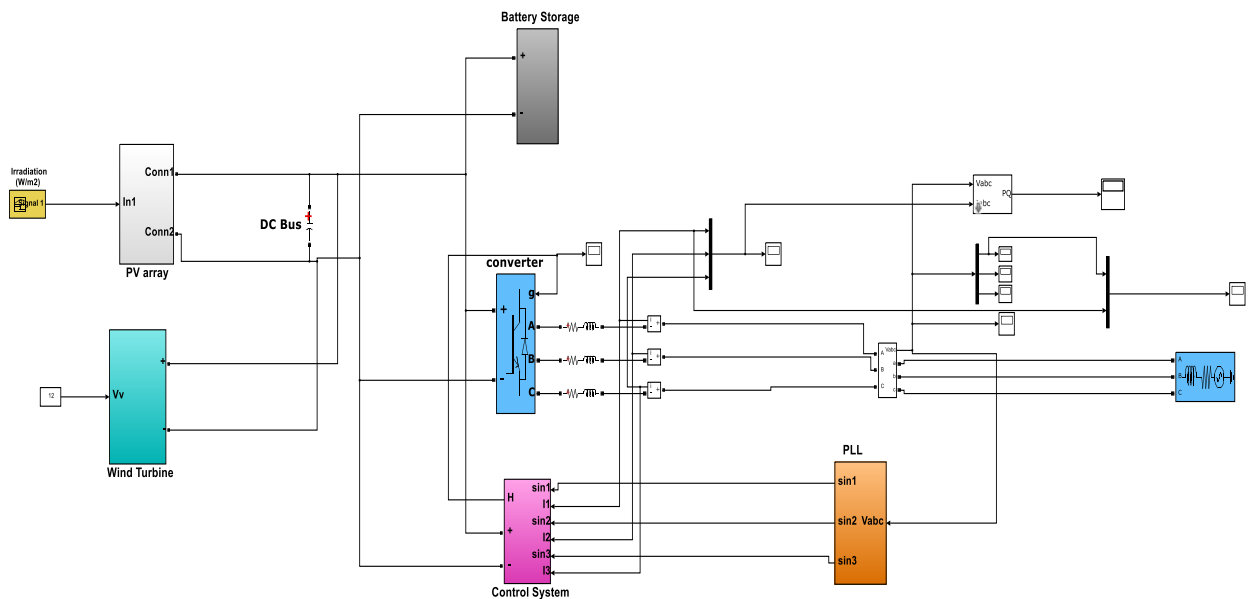


Figure 3.26. Modèle du système hybride dans l'environnement Matlab/Simulink

L'étude de synchronisation nécessite un régulateur de courant d'hystérésis qui a été utilisé pour comparer le courant de référence et le courant réel pour générer les impulsions de commande [70,71]. Cette stratégie de contrôle maintient les courants injectés dans une bande d'hystérésis. Le contrôle du convertisseur côté réseau (*The control of the grid side converter 'GSC'*) ajuste la tension du bus continu à la référence de tension souhaitée et ajuste les valeurs des courants de commande. Une fois que les valeurs requises des courants injectés sont calculées, elles sont transformées en courants de commande

des formes d'onde de chaque phase. Ensuite, le contrôleur du courant d'hystérésis force le courant injecté à poursuivre sa référence [72]. Le schéma de principe et de commande est illustré dans la figure 3.27.

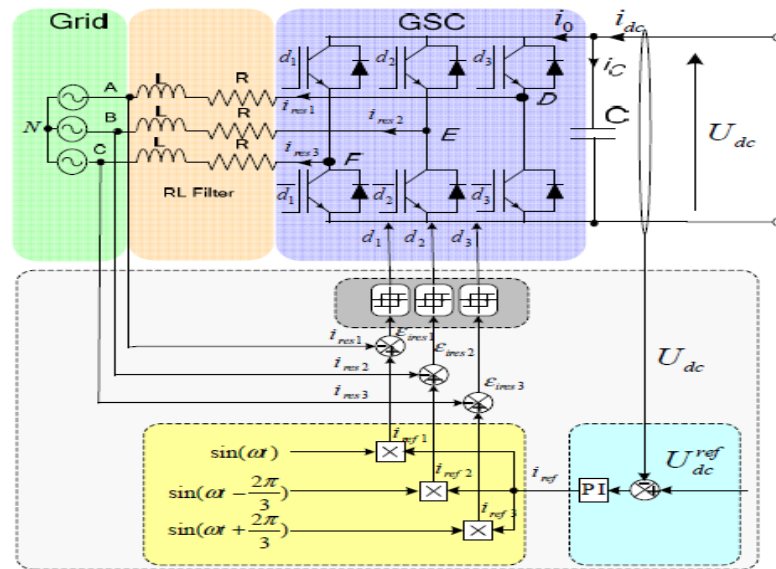


Figure 3.27. Schéma de block de la commande hystérésis [72].

### 3.3. Résultats de simulation

Une modélisation a été effectuée inclut un système d'énergie renouvelable hybride (PV/éolien) avec une unité de stockage d'énergie constitué par un banc de batterie, l'ensemble est raccordé au réseau électrique. La simulation de ce système a été achevée sous l'environnement Matlab/Simulink, et les résultats de simulation suivantes montrent le travail réalisé.

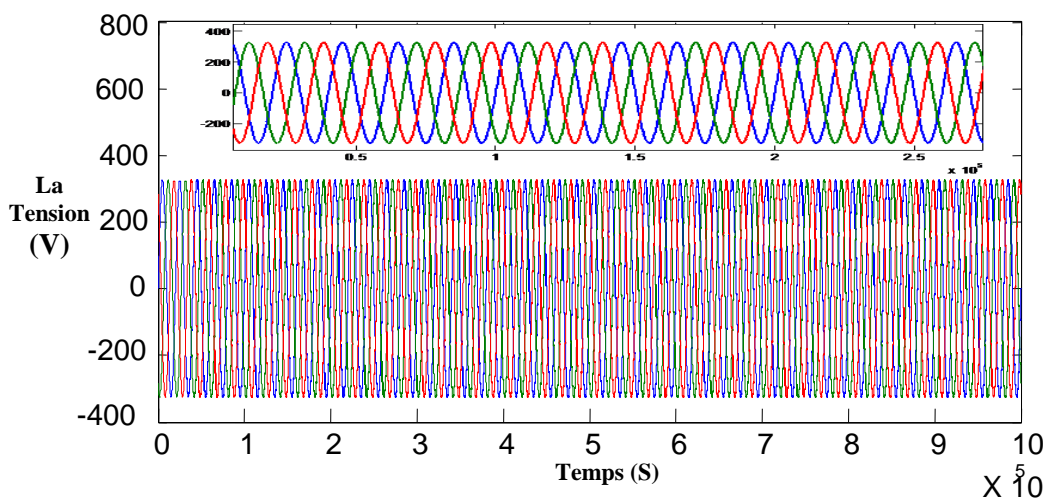


Figure 3.28. Tension de sortie du réseau électrique.

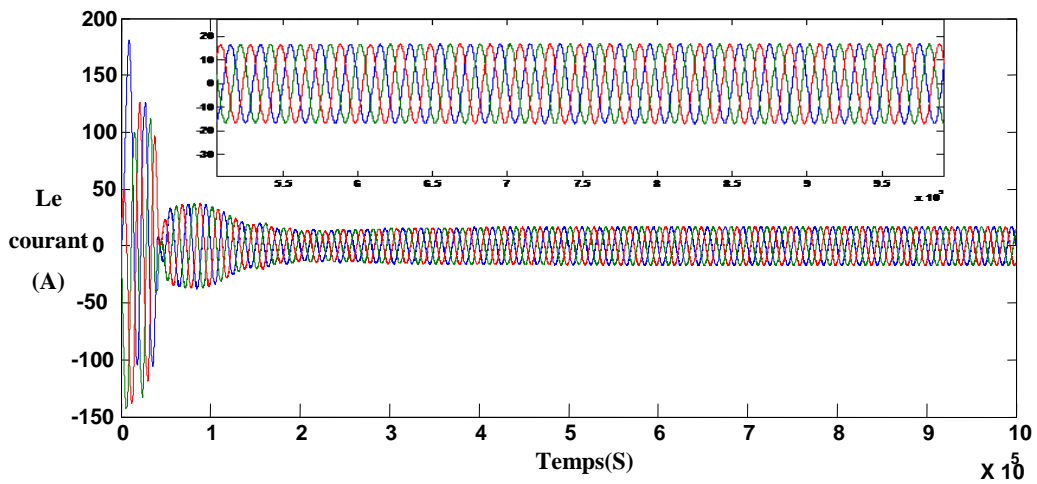


Figure 3.29. Courant de sortie du réseau électrique.

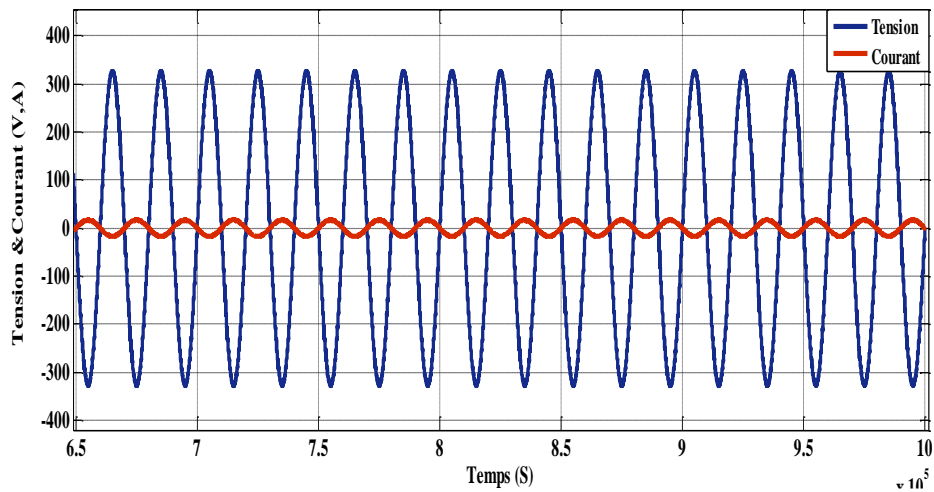


Figure 3.30. Synchronisation du réseau électrique.

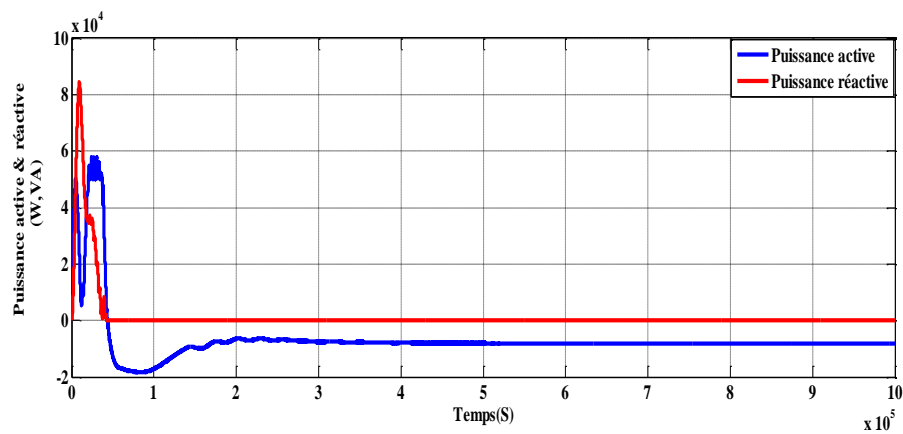
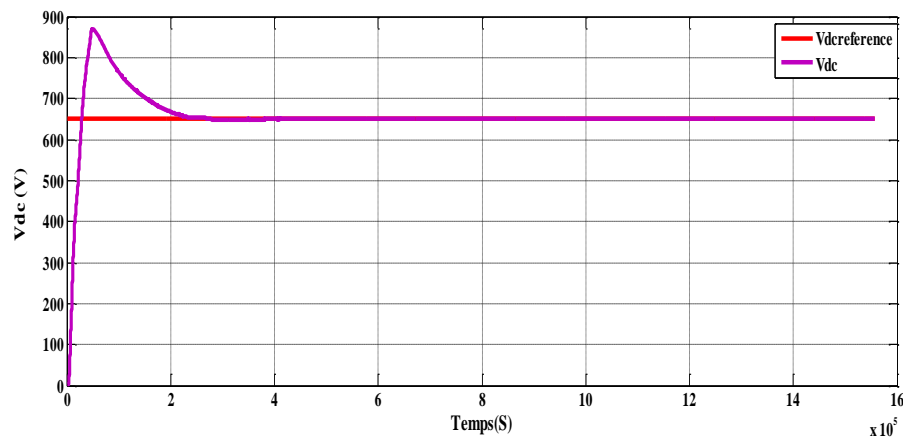


Figure 3.31. Puissances active et réactive du réseau électrique.



**Figure 3.32.** Tension du bus continu.

### 3.4. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus montrent que la tension et le courant de sortie du réseau électrique sont de forme sinusoïdale alternative triphasée comme mentionné dans les figures 3.28 et 3.29. La synchronisation du réseau est traitée par la commande PLL, ou cette commande été prouvé sa performance dont la phase entre la tension et le courant du réseau égale à zéro comme indiqué dans la figure 3.30, et la puissance réactive égale aussi à zéro mais la puissance active est constante avec une valeur approximativement égale à 8270 W comme montré dans la figure 3.31. La combinaison de la batterie avec le convertisseur bidirectionnel et le contrôle appliqué sur le convertisseur permet de maintenir la tension du bus continue constante comme illustré dans la figure 3.32, qui nous permet de noter également, que la tension du bus continue suit convenablement sa référence.

### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude de modélisation mathématique a été présenté pour le système hybride à base du système photovoltaïque et du système éolien avec un système de stockage d'énergie par batterie de condensateur pris en considération la connexion au réseau électrique. Différentes méthodes de contrôle ont été appliquées au sein des convertisseurs de puissance utilisées qui prouve leurs performances pour le système hybride. Ou le point de puissance maximale a été obtenu par les méthodes citées et ce, pour les deux systèmes photovoltaïque et éolien. La régulation de la tension a été achevée pour le bus continu, ou cette dernière a bien suivie sa référence. La charge et la décharge de la batterie a été bien contrôlée, ainsi que la synchronisation du réseau qui a été effectuée en utilisant la commande PLL, ou un contrôle hystérésis a été appliqué à l'onduleur qui affirme la qualité des résultats obtenus et qui répond aux conditions exigées pour la fréquence et le déphasage.

Le prochain chapitre expose un état d'art sur les méthodes d'optimisation du système hybride étudié (PV/éolien/batterie).

# Chapitre 04

## Méthodes d'optimisation des systèmes hybrides : Revue de Littérature

---

---

### 4.1. Introduction

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser ou minimiser une fonction objective. En effet, dans la vie courante nous sommes fréquemment confrontés à des problèmes réels d'optimisation plus ou moins complexes. Les problèmes, qui se posent dans de nombreux domaines d'application des systèmes électriques, sont difficiles à déterminer par calcul. Par conséquent, les techniques d'optimisation évoluent constamment et ont récemment fait l'objet de nombreuses nouvelles études.

Ce chapitre se concentre sur une description détaillée des méthodes d'optimisation utilisées et développées pour le système hybride. Généralement, un modèle mathématique d'optimisation est composé de variables et de la relation entre les variables et les contraintes. Les travaux cités dans la littérature utilisant des techniques d'optimisation pour résoudre les problèmes d'énergie renouvelable ont augmenté ces dernières années. Diverses méthodes ont été proposées, certaines basées sur des approches plus traditionnelles telles que la programmation linéaire mixte d'entiers et d'intervalles, la relaxation lagrangienne, la programmation quadratique, ...etc. Un nombre important de nouvelles méthodes est également basé sur des approches heuristiques, en particulier les algorithmes génétiques et l'optimisation des essaims de particules [73].

### 4.2. Définition

L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant le « meilleur » élément d'un ensemble selon certains critères prédéfinis. De ce fait, l'optimisation est omniprésente dans tous les domaines et évolue sans cesse depuis EUCLIDE.

Un problème d'optimisation (minimiser ou maximiser) est déterminé par un ensemble de données et un ensemble de contraintes, et un ensemble de solutions. Parmi les solutions, un sous-ensemble indique les solutions possibles respectant les contraintes du problème formulé, à chaque



solution est associée une valeur  $f(s)$  qui représente sa qualité. La résolution du problème d'optimisation consiste à trouver une solution  $s^* \in X$  qui minimise ou maximise la valeur  $f(s)$ . Une solution contient un ensemble de quantités généralement numériques. L'ensemble de ces valeurs est souvent regroupé dans un vecteur représentant une solution.

Une contrainte d'un problème est une restriction imposée par la nature et les caractéristiques du problème sur les solutions proposées. On distingue deux catégories de problèmes d'optimisation : continus et discrets. Dans la première catégorie, les variables constituant une solution donnée sont de type réel et entier, naturel ou binaire pour le deuxième cas [74].

### 4.3. Techniques d'optimisation

L'optimisation de la capacité d'un système de génération hybride devient très compliquée, dans le cadre de la minimisation de la fonction objective, en raison de l'incertitude dans les énergies renouvelables ainsi que la demande de charge et la non-linéarité des composants du système. La gestion optimale des ressources dans un système de génération hybride est cruciale pour atteindre un coût acceptable et un niveau de fiabilité. Le surdimensionnement des composants du système augmentera le coût du système, tandis que, le sous dimensionnement peut entraîner une défaillance de l'alimentation [75]. Ainsi, les soins suffisants doivent être pris pour concevoir un système fiable à un coût minimal [76].

Les unités de production PV et éoliennes sont les technologies les plus prometteuses pour alimenter la charge dans les régions éloignées, rurales et même connectées au réseau électrique. Un inconvénient majeur de ces unités est la nature imprévisible des sources d'énergie solaire et éolienne. En outre, les variations de ces sources ne peuvent pas correspondre avec le temps de distribution de la demande. Ces inconvénients se traduisent par des sérieux problèmes de fiabilité dans la conception et le fonctionnement des systèmes PV et éolienne. D'autre part, le dimensionnement est une approche pour surmonter les problèmes de fiabilité. Cependant, il peut être coûteux [77].

Le choix d'une technique d'optimisation dépend finalement des critères de conception adoptés, des informations disponibles, des ressources informatiques et de la précision de la technique.

#### 4.3.1. Méthodes classiques

De nombreuses approches et algorithmes d'optimisation des systèmes hybrides d'énergie renouvelable ont été étudiés, avec une attention particulière sur l'amélioration de la fiabilité et la réduction du temps de calcul des modèles d'optimisation. Les méthodologies de dimensionnement les plus courantes rapportées dans la littérature sont les méthodes de construction graphique, les méthodes probabilistes,

les méthodes analytiques, les méthodes itératives, méthodes d'intelligence artificielle et méthodes hybrides. Les méthodes probabilistes, analytiques et itératives exigent la continuité et la différentiabilité des équations décrivant le problème, entraînant des calculs intensifs et ne sont pas adaptées à la simulation des performances dynamiques ou facilement capables de prendre en compte des facteurs tels que les contraintes thermiques et la dégradation des composants [78]. Si les problèmes d'optimisation ont des dimensions problématiques élevées avec plusieurs optimums locaux, comme le cas dans un système énergétique complexe, les approches d'intelligence artificielle comme des techniques d'optimisation heuristique sont plus favorables, car ces méthodes sont capables de prendre en compte les performances dynamiques variables avec une faible erreur moyenne [79]. Le choix d'une technique d'optimisation dépend finalement des critères de conception adoptés, des informations disponibles, des ressources informatiques et de la précision de la technique [78].

La plupart des techniques classiques utilisent des algorithmes uniques (mono) avec une fonction nommée SOO (*Single Objective Optimisation*). Les techniques modernes utilisent des algorithmes simples et hybrides pour résoudre mono ou multi objective problèmes d'optimisation (SOO ou MOO). Par conséquent, les méthodes modernes sont plus flexibles dans le traitement de problèmes d'optimisation complexes, et ils fournissent des résultats plus précis.

#### **4.3.1.1. Méthodes déterministes**

Dans l'approche déterministe, chaque ensemble des variables d'état est uniquement déterminé par les paramètres du modèle et par des ensembles d'états précédents de ces variables, il y a donc toujours une solution unique pour des paramètres donnés, contrairement à l'approche probabiliste. Le travail proposé dans [80], présente un état de l'art sur les ressources d'énergies, particulièrement le système PV où une étude a été faite pour déterminer la taille et le coût du système photovoltaïque en NEPAL.

Un système d'énergie photovoltaïque autonome est conçu pour faire fonctionner des appareils résidentiels tels qu'une lampe fluorescente, une lampe à incandescence et un ventilateur de plafond en utilisant des méthodes standards [81]. La charge totale est estimée pour quatre heures de fonctionnement par jour. Le dimensionnement minimum du système de stockage d'énergie par batterie et du système PV a été obtenu. L'algorithme DIRECT est un algorithme déterministe efficace pour trouver l'optimum global de plusieurs problèmes. Cet algorithme est utilisé dans [82], pour déterminer les configurations optimales et minimiser le coût total du système tandis que la disponibilité de l'énergie est garantie. Dans cette étude, la fiabilité du système est évaluée en analysant le SOC de la batterie et l'équilibre énergétique entre les générations et la demande. En outre, l'étude a trouvé que le système hybride PV/éolien/diesel s'avère être techno-économique pour répondre à la

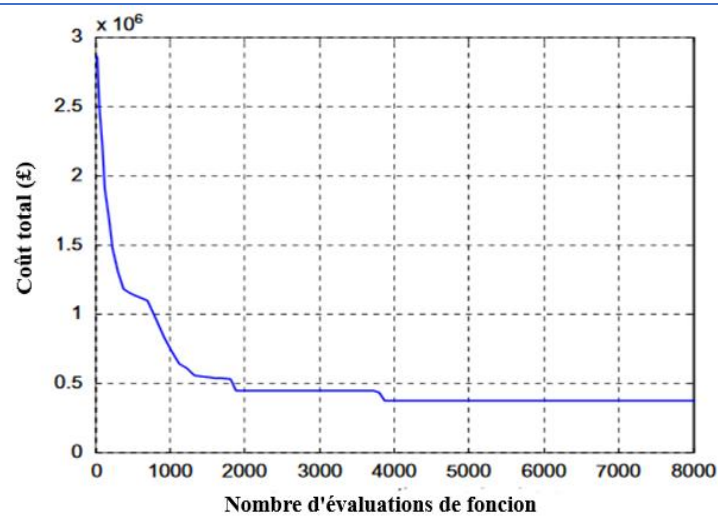
demande aux besoins énergétiques des consommateurs éloignés. La fonction objective utilisée pour minimiser le coût total du système est donné par l'expression suivante :

$$\min STC(x) = \min(C_T(x) + C_M(x) + C_I(x) + C_{T,D}) \quad (4.1)$$

Où  $x$  est le vecteur des variables de dimensionnement :  $x = N_{PV}, N_{WT}, N_{bat}$ .

**Tableau 4.1** Configuration optimale et coût du système éolien /PV /diesel/batterie.

Type	1	2	3	4
$N_{PV}$	2	9	1	0
$N_{WT}$	0	0	2	0
$N_{bat}$	5	3	3	2
<b>Coût (k€)</b>	388.540			



**Figure 4.1** Coût total du système par optimisation du système hybride Eolien/PV/Diesel/Batterie [82].

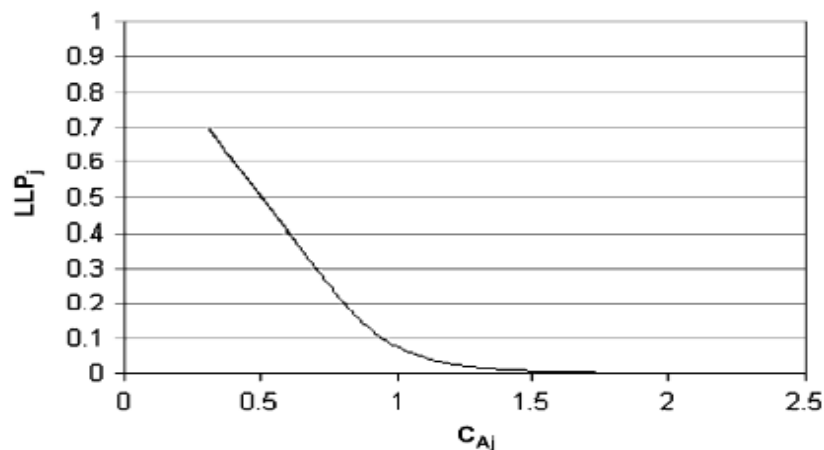
#### 4.3.1.2. Méthodes probabilistes

Un modèle probabiliste est celui où les résultats possibles sont multiples, avec différents degrés de certitude ou d'incertitude d'occurrence. L'approche probabiliste prend en compte l'effet de la variabilité aléatoire des paramètres. Les approches probabilistes permettent de quantifier la variation et l'incertitude, principalement en utilisant des distributions au lieu de valeurs fixes. Cette technique est également utilisée par certains chercheurs pour résoudre le problème de dimensionnement du système hybride. Cependant, l'approche probabiliste ne peut pas représenter la performance du changement dynamique du système hybride qui est le principal inconvénient de cette méthode [83].

La taille optimale du système hybride (PV/éolien) est calculée par heure. Le système hybride peut également être évalué par mois pendant les jours où le système PV à un rayonnement solaire minimum et une faible puissance d'éolienne. Deux avantages peuvent contenir cette technique sont les coûts du système et les collections de données de la charge sont minimales [84].

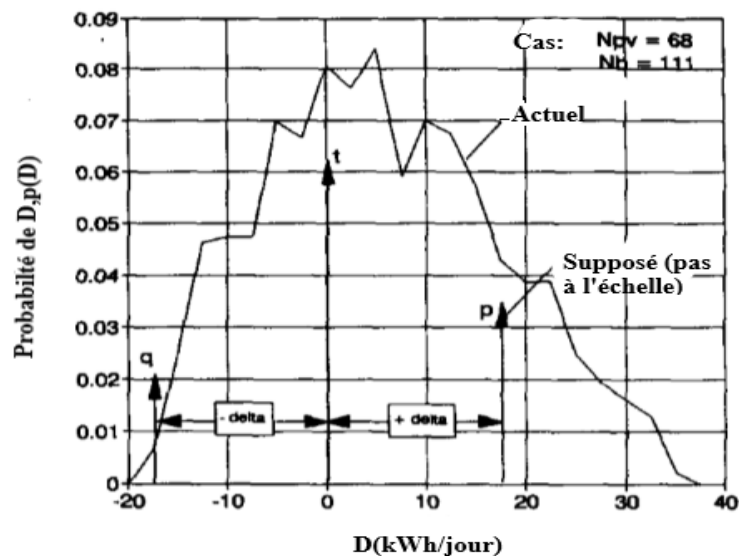
BAGUL et al [85] ont utilisées l'approche probabiliste pour déterminer la relation entre le nombre de panneaux PV et de batteries pour atteindre une fiabilité donnée si la capacité nominale de l'éolienne et la demande de charge sont connues. KARAKI et al [86] ont appliqué un traitement probabiliste d'un système autonome de conversion d'énergie (PV/éolienne) alimentant une charge. La méthodologie utilisée fixe une limite supérieure aux batteries de stockage requises et prédire l'énergie attendue non fournie au système hybride compte tenu des cycles de charge/décharge des batteries. La combinaison des deux modèles séparés PV et éolienne a été obtenue et la théorie de la convolution a été utilisée. Autres études ont été faites concernant la performance du système hybride basée sur une approche statistique de la collecte de données [87,88]. Le concept d'étude dans la référence [87], permet de définir la relation entre le déficit énergétique et la demande d'énergie, en fonction de la charge pendant la durée totale de fonctionnement de l'installation. En termes statistiques, la valeur LLP réfère à la probabilité que le système ne soit pas en mesure de répondre à la demande :

$$LLP = \frac{\int \text{Déficit d'énergie}}{\int_t \text{Demande d'énergie}} \quad (4.2)$$



**Figure 4.2** Relation entre  $LLP_j$  et la capacité du générateur  $C_{Aj}$  [87].

La méthode probabiliste appliquée dans [85], utilise les mêmes concepts de base de la théorie des probabilités que ceux utilisés pour l'approximation des deux événements. Le point de départ de cette méthode est la densité de probabilité de D pour une période considérée, qui peut être un mois ou une saison typique. Ou, en termes de paramètres statistiques, la moyenne et l'écart-type de D doivent être connus avant que cette méthode puisse être appliquée. La façon dont ces valeurs de paramètres sont déterminées dépendra de la précision attendue des calculs, ainsi que du temps et des efforts que peut fournir le concepteur.



**Figure 4.3.** Densités de probabilité réelles et approximatives (pour décembre) [85].

Contrairement à la méthode originale qui approximait la densité de probabilité par un processus de Markov à deux événements et la traitait comme une marche aléatoire, la technique suggérée prend en compte la possibilité que l'énergie stockée reste à sa valeur actuelle. La figure 4.3 représente les trois événements suivants :

- **Événement1** : Une augmentation de l'énergie stockée d'un montant  $\Delta$  (kWh), avec une probabilité,  $p$ .
- **Événement2** : Une diminution de l'énergie stockée d'une quantité  $\Delta$ , avec une probabilité,  $q$ .
- **Événement3** : Ni augmentation ni diminution de l'énergie stockée, avec une probabilité  $t$ .

#### 4.3.1.3. Méthodes de construction graphique

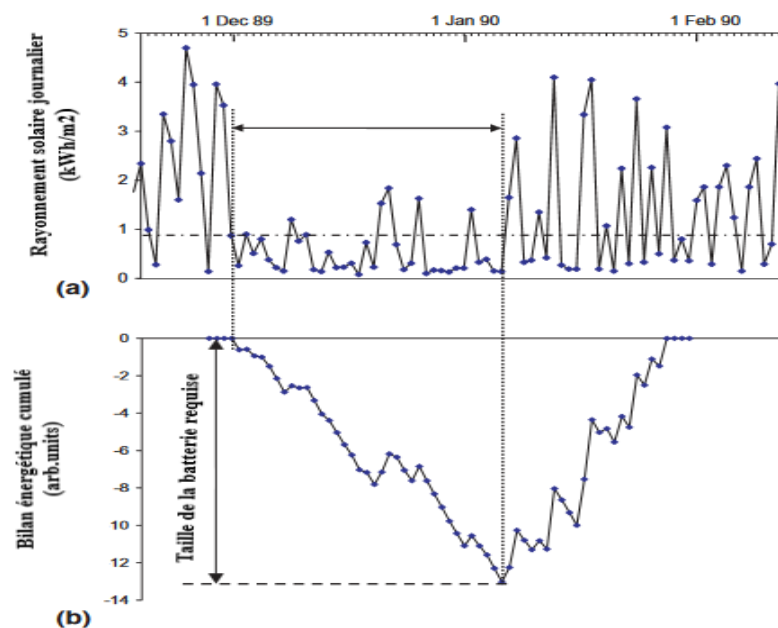
Dans la construction graphique, le problème avec deux variables de conception peut être résolu en observant graphiquement comment ils changent les uns par rapport aux autres. Toutes les fonctions de contraintes sont tracées dans le même graphique. Par inspection visuelle de la région possible, le point optimisé sur le graphique peut être identifié après que les contours de la fonction objective ont été dessinés. Le travail proposé dans [89] a utilisé une longue série de rayonnement solaire où le dimensionnement optimal a été déterminé par une superposition des contributions de cycles climatiques de faible rayonnement solaire quotidien. AI et al [90] ont présenté une méthode pour déterminer la taille optimale du système d'énergie hybride (PV/éolien). La performance du système hybride a été déterminée sur une base horaire, en fixant la capacité des générateurs éolien. L'indice de fiabilité annuel (LOLP) avec différente capacité du panneau PV et de banc de batteries ont été calculés et une configuration optimale (coût et LPSP) a été trouvée en traçant une tangente à la courbe de compromis. BOROWY et SALAMEH [91] ont présenté une technique graphique pour trouver la

combinaison optimale d'un système hybride autonome (PV/éolien) basée sur des données météorologiques à long terme. Pour une consommation de charge typique d'une maison à MASSACHUSETTS et d'un LPSP désiré, la configuration optimale de la batterie et du panneau PV a été calculée en fonction du coût minimal du système. MARKVART [92] a utilisé une technique graphique pour concevoir de manière optimale un système de production d'énergie hybride (solaire/éolien) en utilisant des valeurs moyennes mensuelles de ce système d'énergie hybride. C'est une méthode basique et facilement compréhensible, sans complexité, mais cette technique n'est pas utilisée actuellement car elle manque de flexibilité et est basée sur diverses approximations.

Le travail réalisé dans [89], a déterminé l'énergie nécessaire pour alimenter la charge serait fournie par la taille du système PV à travers la relation suivante :

$$P_0 = \frac{L}{G_{d_0}} \quad (4.3)$$

Où :  $P_0$  est la taille du panneau PV,  $L$  est l'énergie consommée par la charge pour une journée,  $G_{d_0}$  est le rayonnement solaire journalier incident sur le plan du panneau PV.



**Figure 4.4.** Rayonnement solaire journalier et bilan énergétique cumulé durant l'hiver [89].

Figure 4.4 (a) montre le rayonnement solaire journalier à Londres pendant l'hiver de 1989 à 1990. Il est apparu que pour la plupart du temps entre le 1er décembre et le 7 janvier, le rayonnement journalier est inférieur à la valeur moyenne à long terme pour l'emplacement de  $(0,87 \text{ kWh/m}^2)$ . Une estimation rapide du bilan énergétique dans un système conçu pour le rayonnement moyen (b), montre en effet qu'il y a un déficit de l'approvisionnement en énergie pendant une période de temps considérable, qui doit être comblé par la batterie. Ils ont supposé que la batterie est complètement

chargée au début de ce cycle, la taille de la batterie est déterminée par le déficit énergétique à la fin du cycle climatique. Ils ont noté, cependant, que cela prend beaucoup plus de temps avant que la batterie soit complètement rechargée.

#### **4.3.1.4. Méthodes analytiques**

Les méthodes analytiques sont basées sur l'analyse mathématique, analyse théorique et calculs. Ces méthodes utilisent des modèles de calcul pour trouver la taille du SEH en fonction de sa faisabilité économique [93]. Les systèmes d'énergie hybrides sont représentés au moyen de modèles informatiques qui décrivent la taille du système hybride en fonction de sa faisabilité. Par conséquent, la performance des systèmes peut être évaluée pour un ensemble d'architectures de système possible et / ou une taille particulière de composants. La meilleure configuration d'un SEH est déterminée en raison d'un indice de performance unique ou multiple des systèmes analysés. Ce type de méthodologie permet au concepteur de simuler les performances de plusieurs configurations de systèmes hybrides. Néanmoins, ils ont besoin de longues séries chronologiques, généralement un an, de variables météorologiques (solaire et éolienne) pour les simulations. L'évaluation des performances du système hybride peut être réalisée par des modèles de calcul (c'est-à-dire des outils logiciels commerciaux et/ou des approximations numériques de composants du système).

Récemment, plusieurs outils informatiques ont été développés pour évaluer la performance énergétique hybride, qui aide le concepteur à analyser l'intégration des sources renouvelables [94]. CONNOLLY et al [95] ont analysé et comparé différents outils de simulation computationnelle de systèmes énergétiques hybrides. Selon la littérature examinée, un outil de simulation largement utilisé dans l'évaluation de la performance des systèmes énergétiques hybrides est le logiciel HOMER, développé par le Laboratoire National des énergies renouvelables (NREL). Cet outil de simulation a été utilisé par DALTON et al [96] qui ont présenté une étude de faisabilité pour un hébergement touristique de petite à moyenne taille.

Dans [97], les auteurs ont implémenté une méthode analytique pour minimiser le coût de production du système autonome hybride (PV/éolien) à KANDLA, en INDE. Les auteurs ont validé les résultats obtenus par la méthode analytique proposée et les comparés aux résultats obtenus par la méthode de Simulation de MONTE CARLO (MCS). La quantité d'entrée de données métrologiques dans la méthode analytique est inférieure à MCS. Par conséquent, le temps de calcul par cette méthode analytique est relativement moindre par rapport à MCS. PATIL et al [98] ont considéré quatre saisons différentes pour dimensionner un système, en conséquent, le profil de charge est varié. Deux valeurs de fiabilité ont été pris en considération dans ce travail (0.999 ,0.99). La variabilité et la nature non identifiable de la production d'énergie éolienne et solaire présentent des défis considérables pour

maintenir l'équilibre du système. Les auteurs dans [99] ont proposés d'utiliser la transformée de FOURIER discrète pour décomposer le pouvoir d'équilibrage requis en différentes composantes périodiques variables dans le temps.

Le coût net actuel du système hybride est calculé et comparé dans [96] par deux façons à l'aide de différent logiciel de simulation connu par HOMER et HYBRIDS. HOMER est calculé le *NPC* à travers l'équation suivante :

$$NPC(\$) = \frac{TAC}{CRF} \quad (4.4)$$

Avec : *TAC* est le coût total annualisé, le facteur de récupération du capital (*CRF*) est donné par :

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4.5)$$

Où : *N* est le nombre d'années et *i* est le taux d'intérêt réel annuel (%).

HYBRIDS utilise l'équation suivante pour déduire le *NPC* :

$$NPC(\$) = \frac{TCO(1+i)^N}{(1+MDR)^N} \quad (4.6)$$

Où :

*TCO* est la dépense totale en capital et représente tous les coûts initiaux, de remplacement et d'opération / maintenance pour cette année,

*MDR* est le taux d'actualisation du marché ou le taux de rendement de l'investissement.

**Tableau 4.2** NPC pour le SEH

Logiciel	PV (kW)	Générateur diesel (kW)	Convertisseur (kW)	Nbre de batterie	NPC
HOMER	500	600	400	500	13.1
		600	800	1500	17.6
HYBRIDS	0	600	400	500 <sup>a</sup>	16.1

#### 4.3.1.5. Méthodes itératives

Une méthode itérative est une technique mathématique exécutée en utilisant l'ordinateur qui calcule la séquence de la solution de raffinage approximative pour un problème d'optimisation jusqu'à ce que les critères de terminaison soient atteints. En utilisant cette méthode, si le nombre de variables d'optimisation augmente, le temps estimé augmente exponentiellement. L'évaluation des performances des systèmes énergétiques hybrides dans les méthodologies itératives est réalisée au



moyen d'un processus récursif qui s'arrête lorsque la meilleure configuration est atteinte selon les spécifications de conception [94]. LI et al [100] ont utilisé cette approche pour optimiser le SEH (PV/éolien/batterie) basée sur la minimisation du coût du cycle de vie. Le travail réalisé dans [101] a proposé un modèle d'optimisation du système d'énergie hybride (PV/éolien). Le problème d'optimisation a été résolu par la technique d'optimisation itérative. Pour la fiabilité de l'alimentation et le coût du système, les auteurs ont pris en compte le modèle (Loss of Power Supply Probability LPSP) et le modèle de coût d'énergie avec des paramètres tels que la capacité du système PV, la puissance nominale du système éolien et la capacité de la batterie. KALDELLIS et al [102] ont introduit un processus itératif pour le dimensionnement d'un SEH constitué de l'éolienne et de diesel en tant que sources sur la base du coût total. Un modèle de l'éolienne et du système PV a été conçu, en tenant compte du nombre de modules PV et de l'analyse de l'ensemble du système a été entrepris dans [103]. NIKHIL et SUBHAKAR [104], ont proposé une nouvelle méthode itérative basée sur l'apprentissage par rétroaction adaptative, qui a été adopté pour assurer la convergence rapide de l'algorithme de simulation, et la méthodologie de simulation est validée par l'utilisation d'une configuration expérimentale. Les auteurs dans [105] ont développé un algorithme adapté aux deux modes autonome et connecté au réseau où un filtre d'énergie est appliqué pour atténuer la fluctuation de la puissance injectée dans le réseau.

Le travail présenté dans [100] permet de déterminer le dimensionnement optimal du SEH (PV/éolien/batterie). Un algorithme simple a été appliqué pour résoudre le problème de dimensionnement, et suit les étapes suivantes :

- Problème de taille pour,  $N_w$ ,  $N_{PV}$  et  $C_b$ .
- Donné :
  - Un horizon temporel  $[t_0, t_T]$ ;
  - Les puissances moyennes  $P_w(t)$  et  $P_{PV}(t)$  générées respectivement par l'éolienne et le PV, et la puissance moyenne demandée par la charge  $P_L(t)$ , à chaque instant  $t$  dans l'horizon temporel  $[t_0, t_T]$ .
  - Un indice de coût  $H_{système}(N_w, N_{PV}, C_b)$ .
  - Trouver : la solution optimale,  $N_w^*$  (éolienne),  $N_{PV}^*$  (PV) et la capacité de la batterie requise  $C_b^*$ , aussi  $H_{système}(N_w^*, N_{PV}^*, C_b^*)$  est minimale,
  - Sujet à :  $N_w P_w(t) + N_{PV} P_{PV}(t) + V_b SOC(t) \geq P_L(t)$ .

Le concept du coût du cycle de vie du système, comprenant le coût initial en capital, le coût d'exploitation et de maintenance et le coût de remplacement des composants, comme décrit l'équation suivante :

$$H_{\text{système}} = H_{\text{cap}} + H_{\text{ope}} + H_{\text{rep}} \quad (4.7)$$

$$H_{\text{cap}} = N_w C_w + N_{PV} C_{PV} + C_b C_{bat} \quad (4.8)$$

$$H_{\text{ope}} = C_{ope} T_L \quad (4.9)$$

$$H_{\text{rep}} = C_b C_{bat} \sum_{n=1}^{T_{bat}} \frac{1}{(1+i)^{T_L \times n}} + N_w C_w \sum_{n=1}^{T_w} \frac{1}{(1+i)^{T_L \times n}} \quad (4.10)$$

Où:  $N_w$ ,  $N_{PV}$  et  $C_b$  sont le nombre d'éoliennes, de panneau PV et de batteries combinées dans le système hybride respectivement,  $C_w$ ,  $C_{PV}$ ,  $C_{bat}$  sont le coût en capital initial des éoliennes, des panneaux PV et des batteries respectivement,  $T_L$  est la durée de vie du système,  $T_{bat}$  et  $T_w$  sont le temps de service de la batterie et de l'éolienne respectivement,  $i$  est le taux d'intérêt réel.

#### 4.3.2. Méthodes Intelligentes

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui explore des modèles de calcul de résolution de problèmes, où les problèmes à résoudre sont de la complexité des problèmes résolus par des êtres humains. L'intelligence artificielle est un terme qui, dans son sens le plus large, signifie la capacité d'une machine à effectuer des types de fonctions similaires qui caractérisent la pensée humaine. La logique floue et les réseaux de neurones sont les domaines les plus importants des développements et des applications de l'intelligence artificielle.

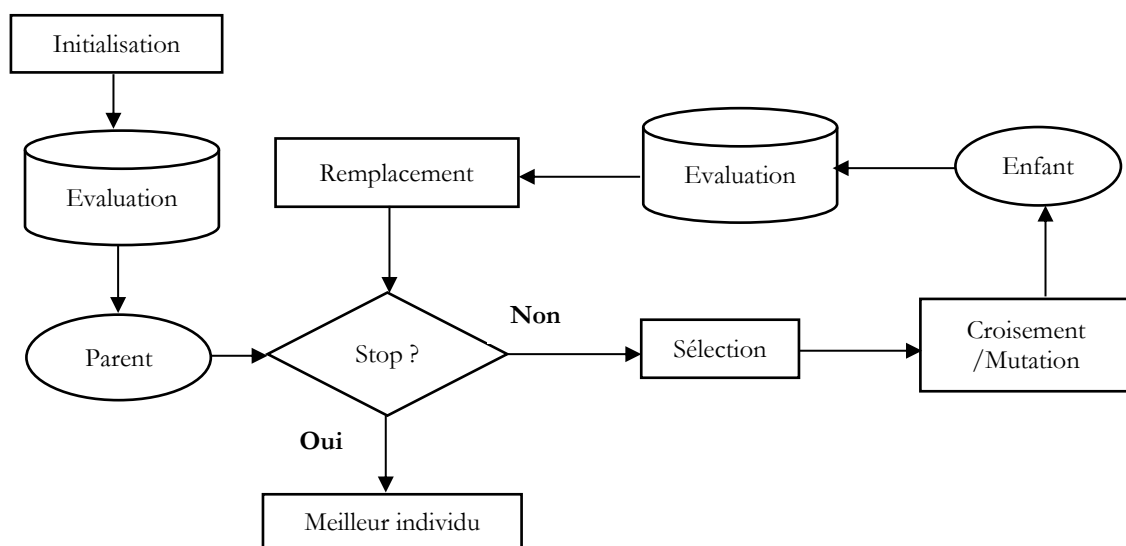
Les approches d'intelligence artificielle telles que les techniques d'optimisation heuristique sont plus favorables, car ces méthodes sont capables de prendre en compte de manière adéquate les performances dynamiques et de changer les variables du système avec une erreur moyenne faible [79]. L'intelligence artificielle est considérée comme une solution appropriée pour de nombreux problèmes techniques où il est difficile de développer un modèle précis associé au système étudié. Elle comprend de nombreuses branches comme les réseaux de neurones artificiels (RNA), la logique floue (Fuzzy Logic), les algorithmes génétiques (GA) et d'autres techniques hybrides qui contiennent deux de ces branches ou plus. L'utilisation appropriée des technologies d'intelligence artificielle amène à des systèmes appropriés avec une bonne performance de l'intelligence artificielle ou d'autres caractéristiques qui peuvent ne pas convenir aux techniques traditionnelles.

Il existe différentes techniques d'intelligence artificielle qui sont largement utilisées pour optimiser un SEH afin de maximiser ses avantages économiques. Des techniques artificielles ont été implémentées par plusieurs recherches pour atteindre le dimensionnement optimal de SEH autonome.

Ces techniques peuvent gérer un objectif à plusieurs problèmes et fournir une solution optimale définie. Les techniques artificielles les plus récentes appliquées aux systèmes SEH (PV/éolienne) sont discutées ci-dessous.

#### 4.3.2.1. Optimisation par algorithme génétique

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes de recherche métaheuristique qui imitent le processus d'évolution par sélection naturelle. Ils commencent généralement par une génération aléatoire d'une population initiale de chromosomes avec ou sans connaissances spécifiques au domaine. Les chromosomes sont représentés comme une structure de données de nombres binaires ou de nombres réels en fonction de la méthode de codage et sont des paramètres de solutions possibles au problème en question. Une fonction objective (fitness) spécifique au problème est utilisée pour cartographier les chromosomes en une valeur de fitness qui est une représentation de la qualité de la solution qu'ils représentent. Les opérateurs d'algorithmes génétiques, qui sont : la sélection, le croisement et la mutation, sont ensuite utilisés pour faire évoluer la population de sa génération actuelle à la suivante dont la valeur moyenne de fitness devrait idéalement être meilleure. Alors que le croisement définit le processus de deux chromosomes accoupler et échanger des segments génétiques. La mutation signifie le processus de changement de certains gènes dans la séquence d'ADN.



**Figure 4.5** Démarche d'un algorithme génétique.

Les nouvelles générations sont ainsi issues de la connaissance des générations précédentes et puisque les individus les plus aptes dans la population sont ceux sélectionnés pour le croisement, leurs bons gènes (de bonnes solutions) dominent la population et l'algorithme converge vers un optimum. Avec une sélection correcte des paramètres, les AG sont capables d'obtenir une solution optimale globale appropriée. L'avantage le plus significatif d'AG pour l'utilisation dans le dimensionnement de

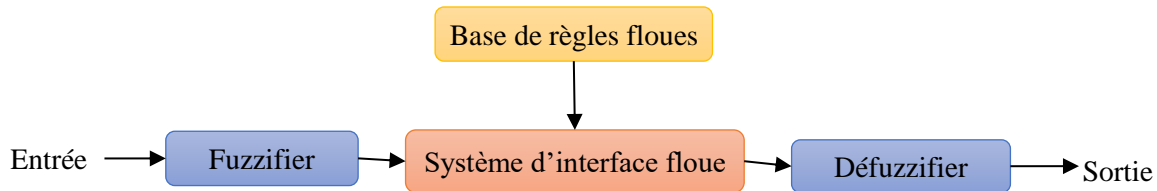
système hybride est qu'il peut facilement passer d'un minimum local et a une capacité assez efficace pour trouver l'optimum global.

De nombreuses études ont implémentée les AG dans la recherche de la solution optimale du SEH. Comme mentionné dans [106], les auteurs ont utilisé les AG pour le dimensionnement optimal et l'allocation des systèmes d'énergies hybrides en mode autonome. Ils ont étudié cinq combinaisons différentes pour une charge résidentielle, et d'utiliser de petits générateurs diesel agrégés au lieu d'un seul générateur diesel de grande taille. L'étude a prouvé que le SEH (PV/éolienne/diesel/batterie) est la combinaison la plus optimale en termes de LCC minimal, de COE, d'énergie de décharge nette et d'émissions de CO<sub>2</sub>. RAJANNA et SAINI [107] ont appliqué l'AG pour trouver le dimensionnement optimale des sources d'énergie renouvelables compte tenu un système de stockage par batterie pour quatre zones différentes à KARNATAKA, en INDE. La combinaison optimale du système est basée sur les deux paramètres d'évaluation économiques TNPC et COE. L'étude a affirmé que les deux scénarios composé du système PV, éolienne et système de stockage avec les autres sources d'énergie sont les plus rentables. L'algorithme génétique adaptatif (AGA) est utilisé par [108], dans le but d'optimiser le système hybride (PV/éolien/batterie) pour les îles WUCHI et ORCHID à TAIWAN, en raison de son adaptabilité améliorée avec la simplicité de calcul pour résoudre ce problème non linéaire. La capacité optimale du système autonome a été atteinte pour les deux sites en termes de coût total et de fiabilité à travers le critère LOLP. Les auteurs dans [109] ont présenté un modèle économique et une méthode d'optimisation pour la performance des systèmes hybrides de production de chaleur et d'électricité qui sont raccordés au réseau et utilisent d'autres sources comme le solaire, l'éolienne et une pile à combustible pour des utilisations résidentielles. L'AG est utilisée pour résoudre le problème d'optimisation et comparé à d'autres méthodes comme le PSO. Les résultats montrent que le système de production proposé raccordé au réseau est le moyen le plus rentable de satisfaire la charge résidentielle dans un proche futur. De plus, l'AG conduit à des meilleurs résultats que l'algorithme d'optimisation de l'essaim de particules (PSO). Une étude est réalisée pour un système d'énergie hybride autonome, en vue d'obtenir un dimensionnement optimal avec un minimum coût [110] où l'AG est appliquée pour résoudre le problème.

#### **4.3.2.2. Méthodes basées sur la logique floue**

Le contrôle de la logique floue est l'une des techniques les plus couramment utilisées dans différents défis d'ingénierie en raison de ses caractéristiques multi-règles. Dans cette technique, les variables gèrent certaines valeurs réelles non numériques et linguistiques qui varient entre des valeurs complètement vraies et complètement fausses et souvent haute, basse, moyenne. Dans l'optimisation du contrôleur de logique floue, tout est défini en fonction de la question du degré, le raisonnement exact est remplacé par un raisonnement approximatif, le modèle mathématique de ce système n'est

pas requis et la décision est basée sur des valeurs estimées. Cette technique comprend trois étapes différentes qui sont : le processus de fuzzification qui prend les entrées du contrôleur et produit un degré d'appartenance pour chaque ensemble flou dans la fonction d'appartenance. La phase d'inférence prend ces appartenances d'ensembles flous et détermine quelles règles doivent être évaluées. Le processus de défuzzification prend ces valeurs et les traduit en un signal de répartition de sortie [111].

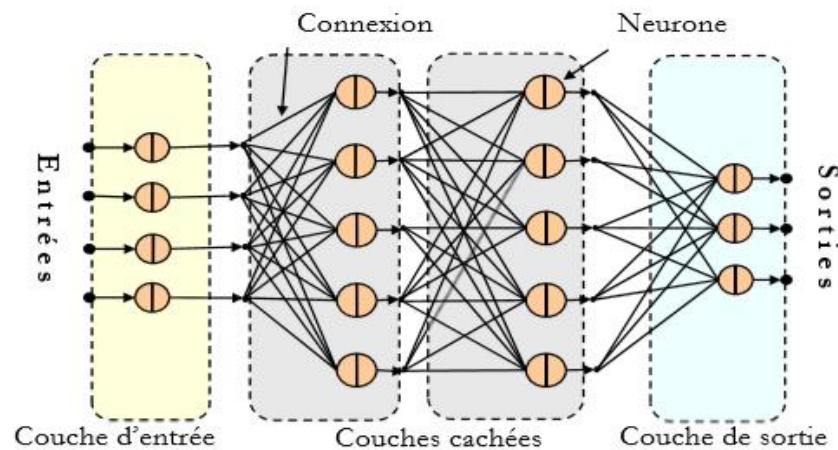


**Figure 4.6** Configuration de base du système de logique floue.

La logique floue est maintenant utilisée dans de nombreuses applications comme l'intelligence artificielle, la linguistique, la logique, l'analyse de décision, la théorie du contrôle, les systèmes experts et les réseaux de neurones. Elle est l'une des nombreuses techniques d'intelligence qui est fortement utilisée pour contrôler ou optimiser de nombreux systèmes d'énergies comme dans [112], les auteurs ont présenté un contrôle flou relié à un système autonome (PV-DG-batterie) basée sur TAKAGI-SUGENO. La diminution de la puissance PV à partir de son point de puissance maximale est effectuée pour maintenir l'équilibre de puissance du système. Une gestion d'énergie basée sur la logique floue est développée dans la référence [113], où une comparaison entre les états de contrôle et la logique floue a été achevée, et les résultats montrent la supériorité du contrôle de la logique floue. Un travail intéressant a été présenté par PABLO et al [114], qui est basé sur la logique floue en tant que contrôleur. Le coût du système est évalué indépendamment avec l'utilisation des états de contrôle. La logique floue est utilisée uniquement pour contrôler les conditions limites de la batterie et du réservoir d'hydrogène. Cependant, la manière manuelle de concevoir ce contrôleur pose certaines questions sur la façon dont ce contrôleur est mieux adapté aux données stochastiques. TAMALY and MOHAMMED [115] ont déterminé l'impact d'interconnexion du système d'énergie (PV/éolien) du point de vue de fiabilité en utilisant un indice de fiabilité basé sur la logique floue pour chaque système d'énergie électrique hybride. Le but d'étude dans [116] est concerné sur la gestion d'énergie d'un système PV autonome. Le travail réalisé est fait par élaboration d'un algorithme basé sur la technique de logique floue qui permet d'optimiser la gestion du système de stockage, d'assurer une plus grande autonomie de la batterie et la distribution d'énergie disponible par le panneau PV et les batteries. Les résultats obtenus montrent que la commande par la logique floue maintient la tension de la batterie presque stable à la fin de la charge.

### 4.3.2.3. Réseau de neurones artificiels

La technique de RNA a une forme de système informatique multiprocesseur. Le RNA se compose d'un certain nombre de processeurs très simples et très interconnectés, appelés neurones, qui sont analogues aux neurones biologiques dans le cerveau. Un réseau de neurone est une représentation artificielle du corps humain qui tente de simuler son processus d'apprentissage. En d'autres termes, RNA est un système adaptatif qui change sa structure en fonction des informations internes ou externes qui circulent dans le réseau [117]. Le RNA est un groupe structuré de neurones (IA) qui pratique les modèles mathématiques pour traiter l'information dépendant de la méthode connexionniste pour faire le calcul. Parmi les différents RNA, on trouve le perceptron multicouche, le réseau d'alimentation multicouche, le réseau de fonction de base radiale, etc., le réseau de neurones à propagation inverse est utilisé pour la prédiction de valeurs optimales pour des localisations inconnues.

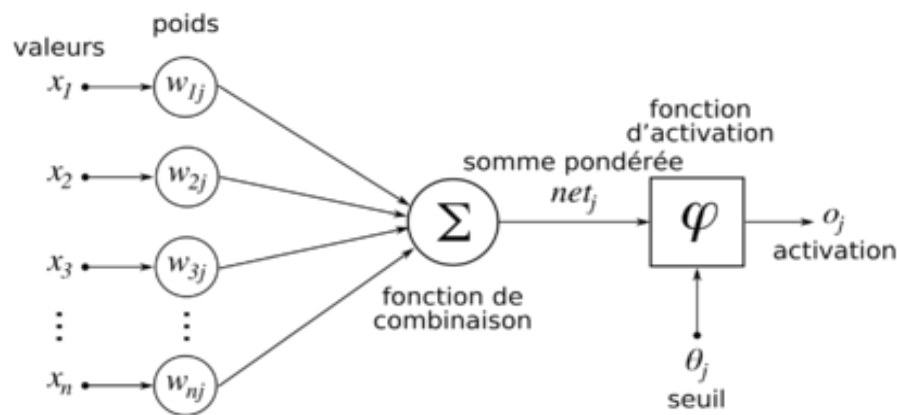


**Figure 4.7.** RNA multicouches.

Un RNA ne nécessite pas de fonctions mathématiques complexes et de modèles physiques lors de la gestion d'un système. De nos jours, le RNA est utilisé dans diverses applications d'ingénierie, telles que l'identification de modèle, la prévision de facteur environnemental, l'estimation de production d'énergie et la prédiction de charge électrique. La structure de base d'un RNA comprend les trois couches suivantes : entrée, cachée et sortie. Un RNA utilise un mode d'apprentissage, où une entrée est présentée au réseau avec la sortie désirée, et les poids sont ajustés pour que le réseau tente de produire la sortie désirée. Après la formation, les poids contiennent des informations significatives, tandis que ces poids sont aléatoires et sans signification avant la formation [118], comme indique la figure 4.8.

$$O_j = f \left( \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i - \theta_j \right) \quad (4.11)$$

Ou :  $f$  est la fonction d'activation du neurone,  $x_i$  est l'entrée  $i$  du neurone,  $w_i$  est le poids synaptique entre le neurone et celui de la couche précédente,  $\theta_j$  est le biais signifiant le seuil d'activation du  $j^{\text{ème}}$  neurone.



**Figure 4.8.** Structure du RNA.

Dans [119], les auteurs ont proposé une technique hybride combinant l'algorithme d'optimisation de recherche de nourriture bactérienne (BFOA) et de la technique de réseau neuronal artificielle RNA. La stratégie de contrôle appliquée consiste à gérer les flux d'énergie entre les sources d'énergie comme le PV et l'éolienne avec un système de stockage d'énergie et le réseau. Les résultats obtenus prouvent l'efficacité de la méthode proposée avec un minimum coût en fonction de la demande de charge. PUNITHA et al [120] ont présenté une méthode de conductance incrémentale modifiée basée sur les RNA comme approche principale pour surveiller le MPP d'un système PV. Les résultats montrent l'efficacité de l'approche proposée dans la poursuite du MPP. Cependant, l'exactitude et la précision du signal de sortie dépendent du processus d'apprentissage RNA. Les auteurs dans [121] ont suggéré une stratégie de commande basée sur RNA pour un système d'énergie hybride (éolienne/PV) hors réseau avec un système hybride de stockage d'énergie par (batterie/hydrogène). Le système proposé a une capacité de réponse rapide par rapport aux méthodes conventionnelles. Le travail présenté dans la référence [122] a étudié le dimensionnement et l'inclinaison optimaux d'un système de générateur hybride (PV/batterie/diesel) pour les sites éloignés en INDE, avec l'utilisation des techniques d'intelligences artificiels (IA) sans les données météorologiques. Les valeurs optimales prédites à travers le système d'inférence neuro-floue adaptative et le réseau neuronal artificiel sont comparées aux valeurs calculées. Le coût du cycle de vie (LCC) du système hybride optimisé est comparé à la valeur du système PV autonome ainsi que le coût du système DG pour prouver sa rentabilité.

### **4.3.3. Méthodes approchées**

Les méthodes approchées sont connues par le fait qu'elles ne garantissent pas l'optimalité de la solution (elles fournissent des solutions de bonne qualité et des fois optimales), mais elles nécessitent des coûts de recherche raisonnables. Elles sont plus pratiques dans le cas où on cherche une solution de bonne qualité dans un bref délai. Particulièrement, pour la résolution des problèmes difficiles dont la résolution exacte est très coûteuse. Ces méthodes peuvent être classifiées en deux catégories : les méthodes heuristiques et les méthodes métaheuristiques.

#### **4.3.3.1. Techniques heuristiques**

Les techniques heuristiques de recherche ont été établies depuis les années 1940. L'heuristique comprend des stratégies de recherche de solutions par essais et erreurs pour des problèmes complexes dans des limites de temps réels. Les méthodes heuristiques peuvent être considérées comme des procédures simples et satisfaisantes, mais pas nécessairement optimales, des solutions à de grandes instances de problèmes complexes rapidement.

Dans un SEH, les problèmes en temps réel sont alors complexes que le calcul de toutes les solutions est tout simplement impossible. En outre, parfois la solution la plus efficace déterminée serait impossible à implémenter. Par conséquent, le but est de trouver des solutions efficacement bonnes, mais réalisables dans des limites de temps [123]. L'usage d'une méthode heuristique est efficace pour calculer une solution approchée d'un problème et ainsi accélérer le processus de résolution exacte. Généralement, une heuristique est conçue pour un problème particulier, en s'appuyant sur sa structure propre sans offrir aucune garantie quant à la qualité de la solution calculée.

#### **4.3.3.2. Méthodes métaheuristiques**

Les algorithmes métaheuristiques ont été développés dans les années 1980 et 1990. Ils incluent des stratégies qui sont inspirées de la nature car elles ont été développées en fonction du comportement de la nature. Selon la définition proposée en 1996 par OSMAN et LAPORTES, une métaheuristique est un processus itératif qui subordonne et guide une heuristique, en combinant intelligemment plusieurs concepts pour explorer et exploiter tout l'espace de recherche. Des stratégies d'apprentissage sont utilisées pour structurer l'information afin de trouver efficacement des solutions optimales, ou presque optimales [124]. Les métaheuristiques sont des généralisations d'heuristiques dans le sens où elles peuvent être appliquées à un large ensemble de problèmes, nécessitant peu de modifications pour être adaptées à un cas spécifique. Dans certains cas, la complexité des problèmes à résoudre est alors élevée que même heuristique et les méthodes métaheuristiques ne sont pas capables d'obtenir des solutions précises dans des temps d'exécution raisonnables. Dans ces cas, le traitement parallèle



devient un moyen intéressant afin d'obtenir de bonnes solutions dans des temps d'exécution réduits. La méthode la plus utilisée pour classier les algorithmes métaheuristiques est basée sur les méthodes de trajectoire par rapport aux méthodes basées sur la population, bien que d'autres classifications possibles soient fondées sur la mémoire, inspirées par la nature, ...etc. [125] :

Les métaheuristiques de trajectoire sont celles qui utilisent une solution unique pendant le processus de recherche et le résultat est également une solution unique optimisée. La plupart d'entre elles sont des extensions de procédures d'amélioration itératives simples qui intègrent des techniques permettant à l'algorithme d'échapper aux optima locaux. Les principales métaheuristiques basées sur la trajectoire incluent : recuit simulé (SA), recherche tabou (TS), procédures de recherche adaptative randomisée gloutonne (GRASP), recherche de voisinage variable (VNS), recherche locale itérée (ILS), ...etc.

Les métaheuristiques basées sur la population utilisent une population de solutions qui évoluent pendant un nombre d'itérations donné, renvoyant également une population de solutions lorsque la condition d'arrêt est remplie. Les principales métaheuristiques basées sur la population incluent : algorithmes génétiques (AG) et algorithmes évolutifs (EA), optimisation des colonies de fourmis (ACO), optimisation des essaims de particules (PSO), estimation de l'algorithme de distribution (EDA), évolution différentielle (DE), optimisation des colonies d'abeilles artificielles (ABCO), etc.

D'autre part, il convient de noter qu'à ce jour, la plupart des méthodes d'optimisation de calcul sont concentré sur la résolution de problèmes mono objectifs, y compris des contraintes dans certains cas. Néanmoins, il existe un grand nombre d'applications qui nécessitent l'optimisation simultanée de plusieurs objectifs souvent conflictuels. Certains chercheurs ont donc proposé des algorithmes multi-objectifs.

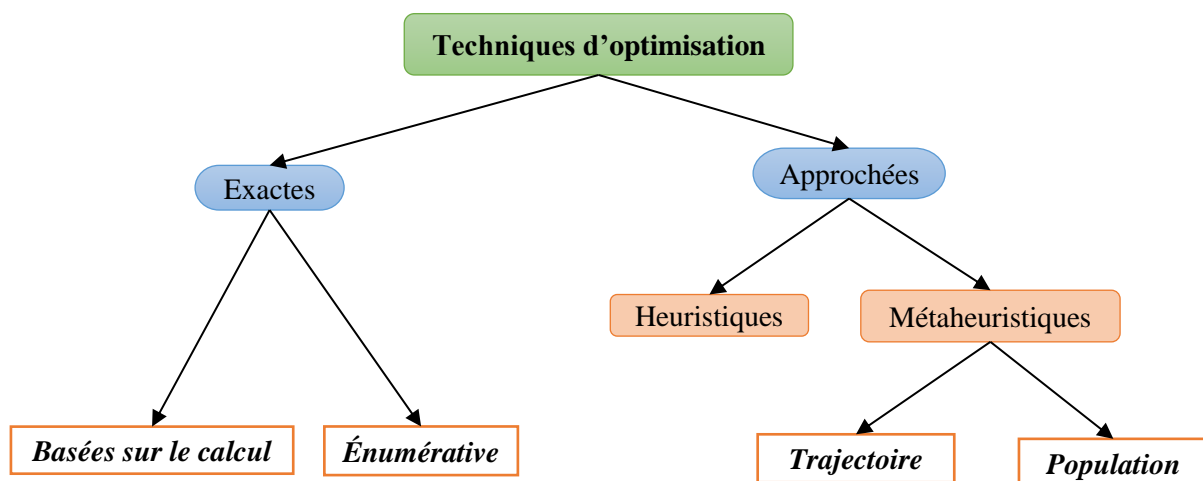


Figure 4.9 Techniques d'optimisation

### ***a. Algorithmes évolutionnaires***

Les algorithmes évolutionnaires sont des techniques de recherche inspirées par l'évolution biologique des espèces, apparues à la fin des années 1950. Les méthodes évolutionnaires reposent sur une analogie avec la théorie de l'évolution naturelle. Dans la nature, les espèces sont capables de s'adapter à leur milieu sous la pression de la sélection naturelle, et d'évoluer à partir de leur héritage génétique de manière à accroître leur adaptation au fil des générations. C'est une métaphore du paradigme DARWINIEN qui est utilisée dans les algorithmes évolutionnaires pour la résolution de problèmes d'optimisation. L'algorithme évolutionnaire consiste en une suite de générations reproduisant les principes de l'évolution naturelle en agissant sur une population d'individus à l'aide d'opérateurs de deux types [126] :

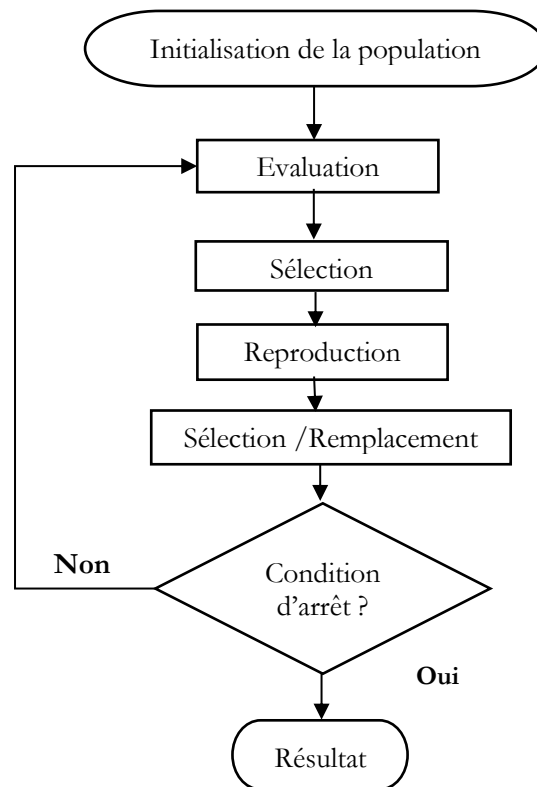
- Des opérateurs DARWINIENS qui transposent les mécanismes de sélection naturelle en orientant la recherche vers les solutions les mieux adaptées.
- Des opérateurs d'évolution (ou opérateurs de variation), dont le rôle est de favoriser l'émergence de nouvelles solutions. Ces opérateurs agissent sur une représentation des solutions (codage ou chromosome) en imitant les mécanismes de la génétique (croisement et mutation).

En pratique, une représentation doit être choisie pour les individus d'une population. Classiquement, un individu pourra être une liste d'entiers pour des problèmes combinatoires, un vecteur de nombres réels pour des problèmes numériques dans des espaces continus, une chaîne de nombres binaires pour des problèmes booléens, ou pourra même combiner ces représentations dans des structures complexes, si le besoin s'en fait sentir. Le passage d'une génération à la suivante se déroule en quatre phases : une phase de sélection, une phase de reproduction (ou de variation), une phase d'évaluation des performances et une phase de remplacement. La phase de sélection désigne les individus qui participent à la reproduction. Ils sont choisis, éventuellement à plusieurs reprises, à priori d'autant plus souvent qu'ils sont performants. Les individus sélectionnés sont ensuite disponibles pour la phase de reproduction. Celle-ci consiste à appliquer des opérateurs de variation sur des copies des individus sélectionnés pour en engendrer de nouveaux, les opérateurs les plus utilisés sont :

- Le croisement (ou recombinaison), qui produit un ou deux descendants à partir de deux parents,
- et la mutation, qui produit un nouvel individu à partir d'un seul individu.

La structure des opérateurs de variation dépend étroitement de la représentation choisie pour les individus. Les performances des nouveaux individus sont ensuite évaluées, durant la phase d'évaluation, à partir des objectifs fixés. Enfin, la phase de remplacement consiste à choisir les membres de la nouvelle génération : on peut, par exemple, remplacer les individus les moins performants de la population par les meilleurs individus produits, en nombre égal. L'algorithme est interrompu après un certain nombre de générations, selon un critère d'arrêt à préciser [127].

Parce qu'ils manipulent une population d'instance de solutions, les algorithmes évolutionnaires sont particulièrement indiqués pour proposer un jeu de solutions diverses, quand une fonction objective comporte plusieurs optima globaux. Ainsi, ils peuvent fournir un échantillon de solutions de compromis, lors de la résolution de problèmes comportant plusieurs objectifs, éventuellement contradictoires [127].



**Figure 4.10** Organigramme d'un algorithme évolutionnaire.

### ***b. Intelligence par essaim***

Les algorithmes basés sur l'intelligence par essaim sont inspirés par des phénomènes naturels. Ces algorithmes s'inspirent généralement des comportements collectifs de certaines espèces dans la résolution de leurs problèmes, dont le but d'évoluer des métaheuristiques permettant la résolution de différents problèmes d'optimisation.

Le mot « essaim » est souvent utilisé pour désigner un ensemble fini de particules ou d'agents interactifs, tel que les oiseaux évoluant en groupes, les bancs de poissons, les colonies de fourmis, les colonies d'abeilles et même les systèmes immunitaires. Les oiseaux évoluant en groupe forment des essaims dont les particules sont des oiseaux, les bancs de poissons forment des essaims dont les particules sont des poissons, les colonies de fourmis forment des essaims dont les particules sont des fourmis, les colonies d'abeilles forment des essaims dont les particules sont des abeilles, le système immunitaire forme un essaim de particules représenté par des cellules de reconnaissance et de

protection. Ainsi, en imitant le comportement social des particules formant des essaims capables de s'autoorganiser, plusieurs algorithmes ont été proposés ces dernières décennies comme : L'optimisation par essaim de particules, le système immunitaire artificiel, les colonies de fourmis artificielles, les colonies d'abeilles artificielles, la recherche coucou, l'algorithme d'optimisation par coucou...etc.



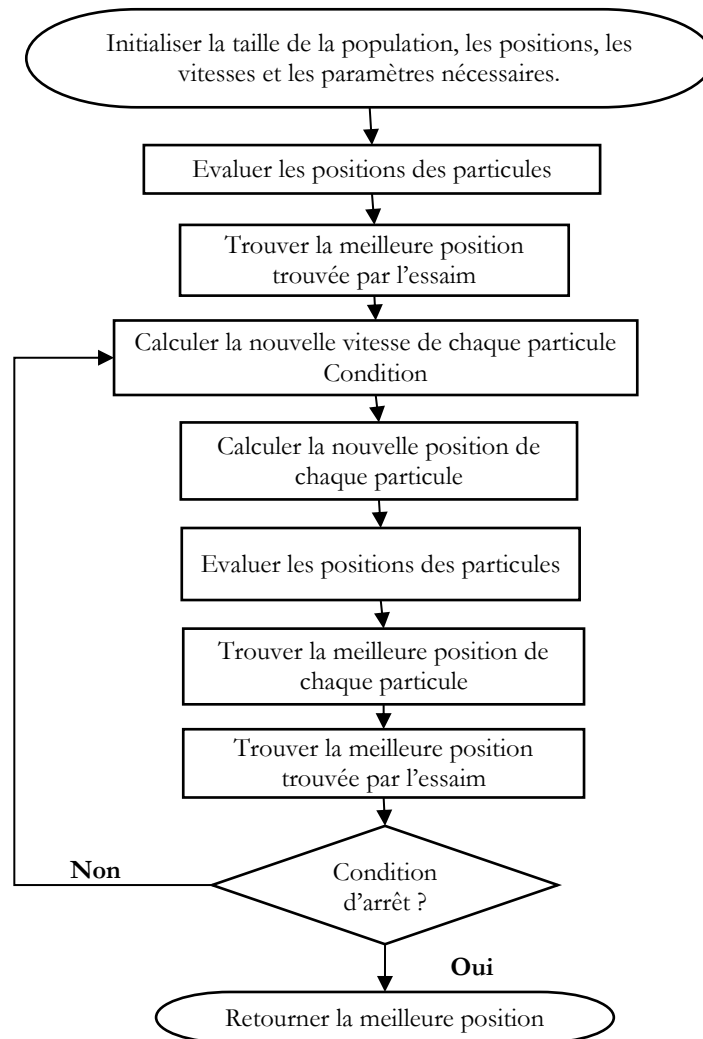
Figure 4.11 Différents types d'essaims

### ***c. Optimisation par essaim de particules***

L'optimisation par essaim de particules est une métaheuristique populaire basée sur l'intelligence par essaim. Elle a été proposée en 1995 par KENNEDY et EBERHART. C'est une technique d'optimisation basée sur des techniques de calcul évolutives. Cette méthode est issue d'une analogie avec les comportements collectifs de déplacements d'animaux. En effet, chez certains groupes d'animaux, comme les bancs de poissons, les oiseaux, etc..., on peut observer des dynamiques de déplacements relativement complexes, alors que les individus eux-mêmes n'ont accès qu'à des informations limitées, comme la position et la vitesse de leurs plus proches voisins.

Les avantages de la PSO sont la simplicité du codage, la facilité d'utilisation, la vitesse de convergence élevée, en plus de dépendre légèrement de la population initiale par rapport aux autres algorithmes, ce qui en fait un algorithme convergent fort. En raison de tous ces avantages, la technique PSO est fréquemment utilisée pour l'optimisation. L'application de la méthode PSO dans l'optimisation des systèmes hybride est utilisée largement dans divers travaux comme cité dans [128], ou une nouvelle approche est proposée pour la conception optimale de systèmes d'énergie renouvelable hybrides. L'algorithme d'optimisation de l'essaim de particules (PSO) a été appliqué pour minimiser simultanément le coût total du système, la perte de probabilité de charge (LLP) et l'émission de CO<sub>2</sub> du système de production d'électricité hybride dans un village rural isolé au sud de l'ALGERIE.

De plus, la méthode proposée est efficacement utilisée pour traiter la réduction des coûts du système hybride en cas de non-existence ou de condition de charge non satisfaite.



**Figure 4.12** Organigramme de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules

PALIWAL et al [129], ont implémenté (PSO) pour trouver la combinaison optimale du système (PV/éolien/diesel) et les unités de batterie en termes de fiabilité et d'économie (LCOE) les paramètres d'évaluation. Comme résultats, les paramètres de fiabilité sont atteints avec moins d'unités de stockage par l'utilisation de grandes capacités de stockage, ce qui réduit les coûts de remplacement. ASKARZADEH et COELHO [130], utilisés PSO et certaines de ses variantes pour trouver la combinaison optimale entre le PV, l'éolienne et les bancs de batteries pour une région éloignée située à KERMAN, en IRAN. Dans cette étude, la minimisation du LCC est utilisée comme fonction objectif économique tandis que le LPSP est utilisé pour évaluer la fiabilité du système. Les résultats ont montré que le système (PV/ éolien/batterie) est le plus rentable et l'algorithme adaptatif de PSO basé sur le poids d'inertie donne des résultats plus efficaces que les autres variantes de PSO. Dans la référence [131], les auteurs ont proposé une PSO modifiée (MPSO) pour trouver la combinaison optimale des deux

systèmes hybrides (PV/éolien/batterie) en site autonome et (PV/éolien) connecté au réseau. Le but de cette étude est de minimiser le coût total (TIC) du système. Le résultat obtenu montre que l'algorithme proposé a fourni un TIC optimal pour le mode autonome. Une étude pour déterminer les dimensions optimales du système hybride (photovoltaïques, l'éolienne et la batterie) a été réalisée par MALEKI et al [132], dans les régions éloignées du Sud, du Nord-Ouest et du Nord-Est de l'IRAN. Les auteurs ont étudié la performance de cinq variantes de PSO différentes avec d'autres méthodes. Les auteurs concluent que la méthode (PSO-CF) est la plus favorable que les autres variantes de PSO et que le système hybride à base de (PV/batterie) convient à la plupart des régions du pays en raison de la bonne disponibilité du rayonnement solaire et du faible vent. Une étude techno-économique a été développée pour un système hybride (PV/éolien/batterie) raccordé au réseau, avec une prise en considération de la fluctuation de la tension [133]. La méthode du PSO est appliquée à l'étude proposée et comparée à d'autres méthodes améliorées à base du PSO. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode hybride améliorée (FC-TVAC-PSO) par rapport aux autres méthodes, et donner une solution optimale concernant le dimensionnement avec un coût de prestation pour le système hybride durant sa durée de vie.

#### ***d. Nouvelles techniques d'optimisation***

D'autres méthodes métaheuristiques récentes et développées ont été appliquées dans la littérature, en vue d'optimiser un système hybride d'énergie renouvelable avec un système de stockage d'énergie et trouver une solution optimale au problème posé. Dans [134], l'auteur a implémenté l'algorithme MBA (Mine Blast Algorithm) pour trouver le dimensionnement optimal pour un SEH en termes de minimisation du coût annuelle pour HELWAN en EGYPT. La fiabilité du système est évaluée à travers d'assurer l'équilibre de puissance entre la production et la charge. L'auteur a utilisé des données réelles mesurées du rayonnement solaire, de la vitesse du vent et de la température pour étudier la taille optimale pour trois combinaisons différentes. La combinaison la plus rentable côté coût a été trouvée pour le système hybride (PV/éolien/pile à combustible).

L'optimisation par des colonies de fourmis (ACO) est une technique d'optimisation métaheuristique avec une capacité inhérente de calcul parallèle, capable de résoudre des problèmes complexes avec un comportement dynamique. SUHANE et al [135], ont appliqués ACO pour trouver la combinaison optimale du système (PV/éolien/batterie/diesel) en termes de réduction le coût total annuel pour un village en INDE. Le paramètre d'évaluation de fiabilité LCOE, qui a une bonne performance globale avec seulement 2% de charge non satisfaite, est trouvé être beaucoup moins que le COE par unité pour le générateur diesel.

L'algorithme d'optimisation de la mouche des fruits (FOA) est une méthode de calcul heuristique évolutive utilisée pour trouver une optimisation globale. Dans [136], les auteurs ont utilisé un algorithme amélioré de FOA (IFOA) pour la conception d'optimisation du SEH autonome (PV-éolien-batterie-diesel) dans l'île de DONGAN en CHINE. Le but de cette étude est de trouver la combinaison de la taille optimale en termes d'un minimum coût et émission. L'étude a confirmé qu'avec moins de nombre d'éoliennes et d'unités de batterie, un meilleur coût total et une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être atteints.

L'optimisation basée sur la biogéographie (BBO) est une méthode évolutive basée sur la population. Peu d'études qui utilisent BBO pour optimiser la taille du SEH consistant un système PV, une éolienne, et d'autres sources avec stockages ont été menées. GUPA et al [137], ont implémenté BBO pour trouver la combinaison optimale d'un SEH autonome (PV/éolien/diesel/batterie) pour minimiser le coût (COE). L'équilibre de puissance entre la production et la demande est considéré pour assurer la fiabilité du système. La colonie d'abeilles artificielles (ABC) est utilisée [138] pour déterminer la combinaison optimale d'un système hybride (PV/éolien) avec système de stockage d'énergie par batterie afin d'obtenir un système rentable et fiable pour un petit village isolé à PATIALA au PENDJAB, en INDE. La fiabilité du système est évaluée par trouver l'effet de défaillance de n'importe quelle unité de génération du système et de minimiser le coût annuel du système. Les résultats obtenus donnent une combinaison optimale avec un minimum coût du système. Une étude est concentrée sur la modélisation, le dimensionnement et l'analyse des coûts d'un système hybride (PV/éolienne / diesel) en considérant deux dispositifs de stockage basé sur la batterie et une pile à combustible [139]. Une version discrète de l'algorithme de recherche d'harmonie (HS) est développée pour dimensionner de manière optimale les composants du système, et comparer à d'autres méthodes. Une nouvelle approche de dimensionnement et de gestion d'énergie du système hybride (PV/éoliens/batterie) a été présentée dans [140]. Le problème d'optimisation a été résolu grâce à un Algorithme de Recherche de Coucou, prenant en compte les contraintes économiques, techniques et environnementales. La méthode proposée a été appliquée pour deux types de charge situés dans le sud de L'ALGERIE. Les résultats de simulation ont confirmé l'efficacité de la méthode d'optimisation appliquée, et donné une meilleure solution que l'algorithme PSO concernant la convergence et le temps de fonctionnement. EKREN et EKREN [141] ont utilisé l'algorithme de recuit simulé (SA) pour optimiser la taille d'un SEH (PV-éolienne-batterie) afin de minimiser le coût total. Les variables de décision sont la taille du PV, la surface balayée par le rotor de l'éolienne et la capacité de la batterie. Ils ont trouvé que l'algorithme SA donne un meilleur résultat que la méthode de méthodologie de surface de réponse (RSM). Une étude d'optimisation a été présentée dans [142], dont le but de trouver le dimensionnement optimal du système hybride (PV/éolien/batterie) alimentant un site autonome. Une méthode métaheuristique récente a été utilisé comme l'algorithme de Firefly (FA), avec pris en considération les critères de

fiabilité d'énergie et le coût du système. La méthode suggérée permet de déterminer la configuration optimale du système, qui peut atteindre avec un minimum coût et une fiabilité souhaitée.

Une méthode plus récente et nouvelle qui a été utilisée dans l'étude d'optimisation pour différents systèmes d'énergie. C'est la méthode de la recherche coucou, cette méthode qui a été inspiré par le parasitisme obligatoire de la couvée de certaines espèces de coucou en pondant leurs œufs dans les nids des hôtes oiseaux. Certains coucous ont évolué de telle manière que les coucous parasitoïdes femelles peuvent imiter les couleurs et les motifs des œufs de quelques espèces hôtes choisies. Les coucous choisissent habituellement le nid d'un oiseau qui vient de pondre ses œufs afin qu'ils soient sûrs que leurs œufs éclosent d'abord parce que les œufs de coucou éclosent plus tôt que leurs œufs d'œufs hôtes. La marche aléatoire globale est réalisée en utilisant les vols de L'evy, donnés par l'équation suivante :

$$X_{g+1,i} = X_{g,i} + \alpha \otimes \text{levy}(y) \quad (4.12)$$

Où :

$g$  indique le nombre de la génération actuelle,

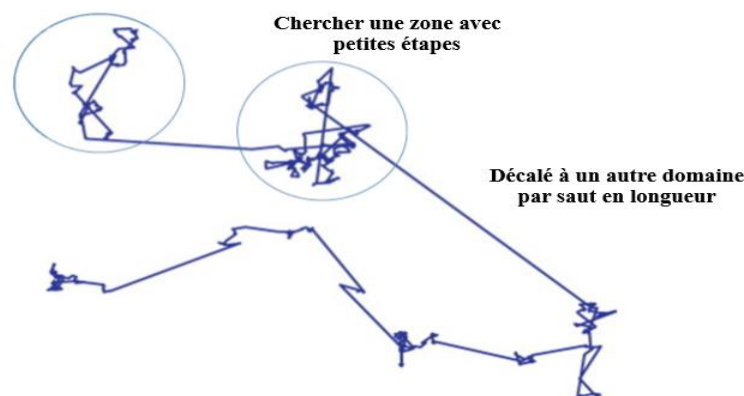
$\alpha$  est la taille du pas liée aux échelles du problème d'intérêt,

$\text{levy}(y)$  est L'evy vol qui représente les caractéristiques les plus puissantes de la recherche de coucou pour générer de nouveaux œufs en fournissant une marche aléatoire.

La combinaison des capacités de recherche locale et de la convergence globale garantie rend la recherche de coucou très efficace.

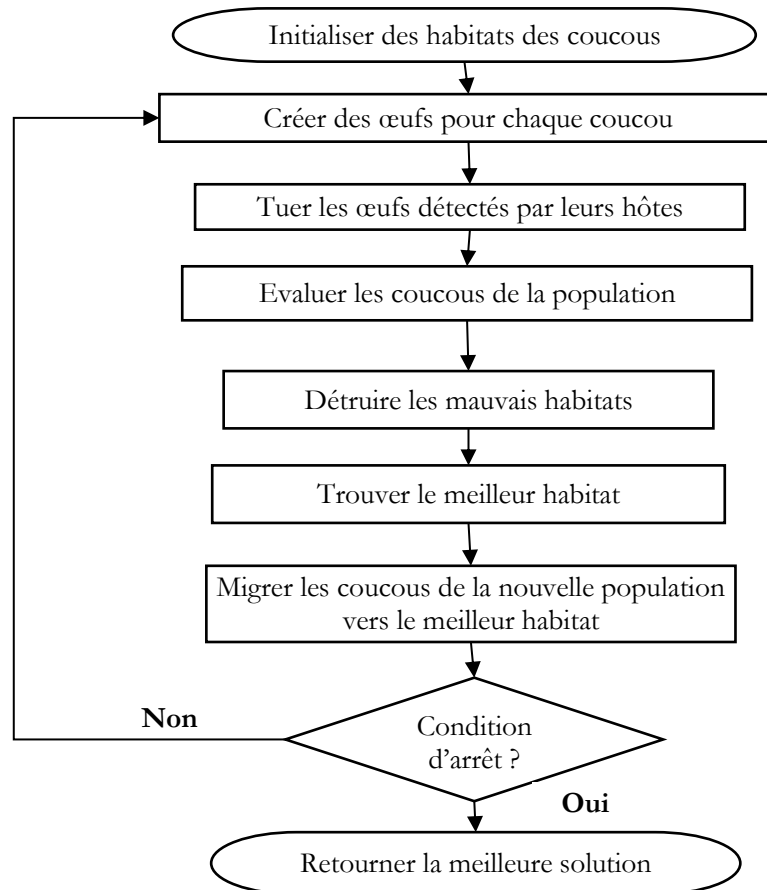
$$\text{levy}(y) = t^{-\lambda}, (1 < \lambda \leq 3) \quad (4.13)$$

$t$  : est le nombre d'itération.



**Figure 4.13** Un vol Levy dans un plan en 2 dimensions





**Figure 4.14.** Organigramme de l'algorithme de l'optimisation par la recherche coucou.

### ***e. Méthodes hybrides***

L'apparition des méthodes métaheuristiques et l'amélioration de ces dernières avec la combinaison d'autres méthodes permettent d'introduire une méthode dite hybride, qui utilise l'influence positive de ces techniques pour obtenir un résultat optimal pour un problème de conception spécifique. Ces méthodes sont évoluées et beaucoup plus appliqués dans la littérature. On trouve aussi l'application de ces méthodes pour les systèmes d'énergies hybrides en vue d'optimiser ces systèmes [133]. KATSIKIANNIS et al [143] ont introduit une méthode hybride de (recuit simulé –recherche Tabu) (SA-TS) pour trouver une solution du problème de dimensionnement optimal du système d'énergie hybride autonome. L'objectif principal de cette étude est la minimisation du coût de l'énergie et les variables de conception du système hybride. Les résultats obtenus sont comparés aux solutions fournies par les méthodes individuelles SA ou TS, ou la méthode hybride (SA-TS) prouve sa performance en termes de qualité et de convergence.

ASKARZADEH [144] a présenté une conception optimale pour déterminer le nombre de panneaux PV, d'éoliennes et de batteries de sorte que le coût total annuel du système hybride soumis à certaines contraintes soit minimisé. Trois algorithmes sont incorporés à savoir : recherche chaotique, recherche d'harmonie et SA pour développer un nouvel algorithme de recuit simulé discret basé sur la

recherche d'harmonie chaotique. Le travail présenté dans [145] a étudié une gestion d'énergie pour un système hybride (PV-éolien) utilisant GA et SVM (Support Vector Machine). L'algorithme génétique codé en binaire est utilisé pour minimiser le coût d'opération du système hybride et la méthode de régression SVM pour la planification de la puissance. Les auteurs dans [146] ont étudié une optimisation du système hybride (PV-éolien) basé sur la probabilité de perte de charge (LLP) et le coût du système et appliqué un algorithme hybride (itératif / génétique). Ils ont utilisé l'algorithme en deux parties : premièrement, un ensemble de configurations possibles pour le système proposé est déterminé en utilisant la partie itérative, tandis que dans la deuxième partie, l'algorithme génétique est appliqué pour trouver la configuration optimale. DEGHAN et al [147] ont utilisé l'hybridation d'un algorithme du PSO et la recherche d'harmonie (HS) pour trouver le dimensionnement optimal d'une installation hybride (PV-éolienne) qui peut fournir la demande de charge électrique d'une manière fiable avec un minimum coût. Un algorithme amélioré hybride combiné la méthode d'optimisation des particules (PSO) et le recuit simulé (SAPSO) pour optimiser un système hybride (éolien/PV/batterie/super-condensateur) est proposé dans [148]. L'objectif de base de ce travail est de réduire au minimum les coûts d'investissement et d'exploitation où les contraintes sont le taux d'utilisation et la fiabilité de l'alimentation. L'algorithme proposé SAPSO est comparé avec l'algorithme PSO et le résultat montre que l'algorithme hybride est plus rapide et efficace que le PSO. MUKHTARUDDIN et al [149] ont utilisé une technique hybride itérative-Pareto-floue (IPF) pour obtenir une meilleure solution compromise un système hybride (PV/éolien/batterie) qui offre un coût minimum et une fiabilité maximale à KUALA TERENGGANU, en MALAISIE. Une approche d'optimisation de l'analyse de décision multicritère (MCDA), une procédure basée sur l'algorithme génétique multi-objectif (MOGA) et la prise de décision multicritère (MCDM) est proposée dans [150], pour d'obtenir une conception optimale d'un système hybride (PV/éolien) connecté au réseau.

#### **4.4. Logiciels d'optimisation**

Des logiciels informatiques commerciaux et académiques sont disponibles qui permettent de déterminer la faisabilité technique et économique des systèmes PV et éoliens. Basé sur les revues des outils de modélisation énergétique disponibles, il existe de nombreux outils logiciels capables d'évaluer la performance du système d'énergie renouvelable pour des configurations de système prédéfinies. Ceux-ci comprennent HYBRID 2, PVSYS, INSEL, SOLSIM, WATSUN-PV, PV-DESIGNPRO, RAPSIM, PHOTO, SOMES, HOMER, RAPSYS, RETScreen, ...etc.

Tout d'abord, parce que ces outils logiciels peuvent simuler et produire un fonctionnement en série chronologique (en pas de temps d'une heure ou moins) d'un système énergétique sur une année ou plus. Deuxièmement, parce que parmi les outils de modélisation de simulation, les outils susmentionnés (bien qu'ils soient relativement coûteux) avaient un nombre élevé d'utilisateurs

enregistrés, ce qui était une indication de leur fiabilité. Des recherches plus approfondies des caractéristiques des outils logiciels identifiés ont montré que le logiciel HOMER était le plus fiable car il peut faire l'opération et l'optimisation des coûts, et l'analyse de sensibilité pour investiguer sur les incertitudes par rapport aux autres logiciels. De plus, le logiciel HOMER a validé des algorithmes intégrés qui peuvent être utilisés pour synthétiser les données d'irradiance et de vitesse du vent en temps de production si les données empiriques ne sont pas disponibles. En règle générale, le logiciel HOMER est apparu comme un outil standard de l'industrie pour la modélisation des systèmes d'énergie hybrides embarqués [151]. D'après ces avantages, on peut considérer le logiciel HOMER est un logiciel fiable et peut résoudre différents systèmes d'énergie hybride en vue d'optimisation.

#### **4.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, un état de l'art est présenté avec une description détaillée sur les méthodes d'optimisation qui existent dans la littérature, et qui peuvent résoudre les problèmes rencontrés dans les systèmes d'énergies hybrides. Contenant des sources d'énergies renouvelables comme le système photovoltaïque et le système éolien avec un système de stockage d'énergie. Différentes méthodes classiques et métaheuristique ont été discutées et commentées sur leur application dans l'étude d'optimisation des systèmes d'énergies hybrides en site autonome ou raccordé au réseau électrique. L'évolution des méthodes métaheuristicques conduit à introduire des méthodes hybrides qui combinent une ou plusieurs méthodes soit nouvelles ou classiques, dont ces types de techniques sont aussi exposés dans cette présentation.

Le prochain chapitre propose une étude d'optimisation du système d'énergie hybride étudié (PV/éolien/batterie) raccordé au réseau. On prendra en considération les critères économiques et techniques du ce système. Une méthode métaheuristique sera appliquée pour résoudre le problème d'optimisation formulé.

# Chapitre 05

## Optimisation d'un système hybride (PV/Eolien/Batterie) connecté au réseau

---

---

### 5.1. Introduction

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'évolution des technologies des composants de l'énergie PV et éolienne rend la conversion de ces énergies de plus en plus rentable et donc leurs utilisations deviennent économiquement compétitives par rapport aux sources traditionnelles.

Dans ce chapitre, une étude techno-économique est proposée pour résoudre le problème d'optimisation du système hybride (PV/éolien/batterie) connecté au micro-réseau. L'objectif principal de l'étude de faisabilité technico-économique est d'identifier un système énergétique capable de produire suffisamment d'énergie pour répondre à la demande énergétique tout en respectant les contraintes imposées par le système électrique au moindre coût. Le but de cette étude est d'obtenir un dimensionnement optimal avec un coût de prestation pour le système étudié. Une méthode métaheuristique nommée « optimisation de l'essaim de particule (PSO) », est utilisée et comparée avec d'autres méthodes à base de PSO. La simulation a été réalisée sous environnement Matlab.

### 5.2. Critères technico-économiques

Pour développer une stratégie de gestion d'énergie dans un système d'énergie renouvelable hybride, il est nécessaire de prendre en compte des critères techniques et économiques. Ces paramètres aideront à concevoir un contrôle d'énergie correct augmentant les performances du système.

#### 5.2.1. Critères techniques

Les critères techniques sont ceux qui se réfèrent au bon fonctionnement de l'équipement, afin d'augmenter les performances et de réduire leur dégradation pendant le fonctionnement normal du système.

### 5.2.1.1. Sources solaires et éoliennes

- **Techniques MPPT** : L'utilisation de ces techniques permet une performance et une production maximales pour une ressource environnementale à un moment donné.
- **Éolienne en tant que générateur principal** : Les configurations qui utilisent les éoliennes comme générateur principal peuvent causer plus de changements dans la production, ce qui provoquera une utilisation accrue des batteries et un nombre élevé de cycles de démarrage / arrêt pour les électrolyseurs et les piles à combustible. L'utilisation de panneaux solaires et d'éoliennes permet une production plus cohérente au cours de la journée et profite de l'utilisation maximale des ressources éoliennes pendant la nuit. Avec cette topologie, l'utilisation d'équipements de stockage d'énergie sera réduite et permettra une maximisation des ressources énergétiques environnementales [152].

### 5.2.1.2. Batterie

Les éléments de stockage d'énergie à court et moyen terme comme les batteries peuvent augmenter la sécurité du système en cas de changements de consommation ou de production, ainsi que lors des démarrages ou des arrêts des équipements de stockage à long terme dont la dynamique est plus lente. De la même manière, les batteries fourniront de l'énergie pendant les situations de déficit énergétique, permettant la réduction de l'utilisation de l'hydrogène, et de la pile à combustible et la dégradation de l'électrolyseur par utilisation.

- **Décharge de la batterie** : La dégradation de la batterie est fortement influencée par sa propre utilisation. L'utilisation de profondeurs de décharge élevées peut accélérer la détérioration de la batterie, réduisant sa durée de vie.
- **Charge de la batterie** : Le processus de charge est crucial pour faire fonctionner les batteries de manière sûre et efficace. Il existe différents protocoles de charge en fonction de la technologie de la batterie et du taux de charge souhaité. Mais, un certain nombre de considérations doivent être prises en compte. L'utilisation de courants de charge élevés peut endommager les cellules et ainsi produire un vieillissement prématuré par la corrosion. Les protocoles de charge rapide nécessitent des tensions élevées et un courant élevé, et provoquent donc un processus de charge inefficace, qui peut entraîner une surcharge si elle n'est pas contrôlée. Malgré de ce qui précède, l'efficacité de la charge est très élevée même en cas de processus de charge rapide. D'un autre côté, un processus de charge lent permet une charge plus sûre et plus efficace mais cela va coûter quelques heures ou même quelques jours.

Par conséquent, ces processus de charge ne seraient pas appropriés dans les systèmes hybrides dont la génération est basée sur des panneaux solaires, car cela dépendra des conditions

météorologiques. De plus, il est nécessaire de prendre en compte d'autres facteurs tels que déséquilibre de charge entre les batteries, typique en connexion en série [153].

- **Maintenance de la batterie** : L'utilisation de batteries nécessite une maintenance de base principalement pour assurer un fonctionnement correct et une durée de vie accrue. Le problème principal est lié à l'autodécharge qui provoque des pertes de capacité et même une sulfatation en cas de longues périodes d'inactivité [153].

### 5.2.2. Critères économiques

Les critères économiques sont ceux qui concentrent leurs efforts sur les décisions économiques, en essayant de donner une réponse du système économiquement viable pour rivaliser avec les systèmes traditionnels.

#### 5.2.2.1. Sources solaires et éoliennes

L'utilisation de générateurs basés sur l'énergie solaire et éolienne, assure une longue durée de vie et de faibles coûts d'exploitation et de maintenance par rapport aux autres technologies renouvelables.

#### 5.2.2.2. Stratégie de gestion de l'énergie

L'utilisation d'une stratégie de gestion d'énergie appropriée prenant en compte les critères techniques cités précédemment, augmentera la durée de vie des éléments et réduira les coûts de remplacement, d'exploitation et de maintenance.

#### 5.2.2.3. Batterie

L'utilisation de systèmes de stockage à court terme comme les batteries augmentent la sécurité du système contre l'utilisation d'éléments à dynamique plus lente tels que les piles à combustible et les électrolyseurs. Un système sécurisé est celui qui assure des charges critiques en tout temps, minimisant les dommages et les coûts de pénalité en cas de panne de courant. De la même manière, les batteries présentent une solution plus économique vis-à-vis des systèmes de stockage d'hydrogène [152].

### 5.3. Solutions techno-économiques

Afin d'optimiser la stratégie de gestion d'énergie basée sur les critères présentés dans la section précédente, la littérature scientifique inclut différentes solutions techniques et économiques pour le fonctionnement des éléments les plus vulnérables du système, comme les batteries et les éléments hydrogène pour la production et la consommation comme l'électrolyseur et les piles à combustible respectivement [152]. Les principales solutions proposées dans la littérature sont décrites ci-dessous.

### 5.3.1. Configuration du système

L'utilisation d'un bus CC constitue un moyen simple de contrôler l'échange d'énergie entre les systèmes, évitant ainsi les problèmes de qualité de l'alimentation et la correction du facteur de puissance. De la même manière, il peut réduire le nombre de dispositifs nécessaires pour adapter la génération, car la plupart des générateurs produisent en courant continu [154].

Dans le cas d'un système connecté au réseau, l'utilisation de super capacités permet de corriger le facteur de puissance en injectant une puissance réactive dans le bus interne [155]. L'utilisation du réseau permettra d'assurer l'équilibre énergétique, de répondre à la demande ou d'absorber de l'énergie en cas de déficit /excès d'énergie respectivement.

### 5.3.2. Batteries

L'utilisation de convertisseurs de puissance augmentera le coût du système, mais permet différents modes de charge pour protéger les batteries. En cas de situations de charge pour les batteries, l'utilisation du mode actuel permettra des charges plus rapides pour un SOC faible. D'autre part, en cas de SOC élevé, le mode de tension protégera la batterie avec un mode de charge plus lent dans lequel le courant sera imposé par la tension de la batterie. L'utilisation d'une profondeur de décharge réduite prolonge la durée de vie de la batterie. Les stratégies avec des bandes passantes d'hystérésis appropriées augmenteront les performances du système, en évitant l'utilisation excessive des batteries et en réduisant les cycles de démarrage et d'arrêt de l'électrolyseur et de la pile à combustible [156].

## 5.4. Stratégies de gestion d'énergie

Pour opérer, intégrer et interconnecter plusieurs dispositifs dans un système de génération, assurant un régime de fonctionnement sûr et atteignant les objectifs, un système de contrôle pour gérer l'énergie est nécessaire. Une stratégie de gestion d'énergie appropriée permet au système de répondre à la demande, d'augmenter la durée de vie des systèmes, de réduire les coûts d'exploitation et, par conséquent, de maximiser les performances du système, ce qui constitue une option techniquement et économiquement faisable. Les objectifs des différentes stratégies de gestion influencent le comportement du système. La plupart des travaux de la littérature scientifique présentent des stratégies simulées pour des systèmes hybrides, afin de maintenir la demande, évitant les critères d'optimisation techniques et économiques et les problèmes multiples associés aux systèmes réels tels que la dégradation des équipements hydrogène ou un vecteur énergétique de gestion correct [152].

### 5.4.1. Stratégies pour satisfaire la demande

L'objectif principal de ce type de stratégie est de satisfaire la demande. Pour cela, il base son algorithme de contrôle principalement sur trois critères de conception : bilan de puissance, état de charge des batteries et stock d'hydrogène, en fonction des éléments qui intègrent le système. Ces variables de conception établissent les limites de fonctionnement des principaux systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries pour le stockage à court terme, et les piles à combustible et les électrolyseurs pour le stockage à long terme.

Le principal avantage de cette stratégie est la simplicité de conception et de contrôle, régie principalement par des algorithmes basés sur des diagrammes simples. D'autre part, le non utilisation de paramètres d'optimisation basés sur la dégradation de l'équipement, les modes de fonctionnement ou les coûts d'exploitation du système, entraîne une solution non optimale d'un point de vue technique et économique [152]. Le travail réalisé dans [157], et d'autres travaux donnent au système de stockage à court terme la responsabilité d'absorber les transitoires et de stabiliser l'équilibre de puissance entre un état de charge maximum et minimum. L'utilisation de systèmes de stockage à court terme implique d'avoir un élément capable de déverser certains écarts dans le bilan de puissance, et donc de limiter l'utilisation du système de stockage d'hydrogène dans des situations de fort excès ou de déficit énergétique.

Dans le cas de topologies isolées, telles que celles présentées dans certains travaux, la production d'énergie, qui ne peut pas être stockée par les systèmes de stockage d'énergie, est jetée par des charges de vidage. Ce fait implique une réduction des performances d'exploitation du système. Inversement, en cas de déficit excessif, une priorisation des charges est nécessaire et dans les cas extrêmes, il est également nécessaire de déconnecter la demande. Ce type de topologie permet une stratégie d'exploitation fortement conditionnée par le dimensionnement du système, et donc la satisfaction de la demande peut être mise en péril.

### 5.4.2. Stratégies incluant un facteur de décision technique

Ces stratégies, aussi bien que d'assurer la demande en tout temps, tenir en compte des critères techniques afin d'assurer la bonne utilisation de l'équipement. La cible principale de ces stratégies est de réduire la dégradation de l'équipement plus sensible pendant le fonctionnement du système. Ces éléments sont la batterie, l'électrolyseur et la pile à combustible. Afin de réaliser l'algorithme de contrôle, l'équilibre de puissance, l'état de charge du système de stockage et les paramètres de dégradation sont définis comme des contraintes de conception. Les principaux avantages de ces stratégies sont leur conception et leur contrôle de complexité moyenne et les bons résultats en termes de performance et /ou de durée de vie du système, en fonction de l'objectif d'optimisation. D'autre



part, les paramètres économiques ne sont pas pris en compte, donc la réponse du système n'est pas optimisée. Comme pour le cas précédent, les solutions les plus courantes intègrent des systèmes de stockage à court terme, et par conséquent, elles fonctionneront en première instance pour absorber ou fournir de l'énergie quand cela est nécessaire. L'utilisation d'un système de stockage à long terme basé sur le système d'hydrogène comme une source auxiliaire qui fonctionnera lorsque les limites de fonctionnement maximales ou minimales des batteries seront atteintes [152].

Dans le cas d'une topologie isolée, l'utilisation de charges de déversement et la priorisation de la demande sont les solutions les plus courantes pour résoudre l'excès d'énergie ou le déficit énergétique élevé. D'autre part, dans le cas des topologies connectées au réseau, le réseau absorbera ou fournira de l'énergie lorsque le système de stockage d'énergie dépasse ses limites de fonctionnement.

### **5.4.3. Stratégies incluant le facteur de décision économique**

Ces stratégies comprennent une analyse économique en plus d'une garantie de l'équilibre énergétique. Ces paramètres économiques aideront à déterminer une solution optimale d'un point de vue économique. Dans de nombreux cas, cette solution optimale ne détermine pas une opération favorable pour l'équipement en raison de ne pas avoir assez de critères techniques pour éviter les problèmes associés aux différents régimes de fonctionnement. Le principal avantage de ces stratégies est la réponse optimale du système d'un point de vue économique. D'autre part, des algorithmes d'optimisation complexes sont utilisés, ce qui augmente la complexité dans les applications réelles. De la même manière, la fiabilité du modèle pour définir la fonction de coût est cruciale pour obtenir les meilleures performances. Les paramètres techniques ne sont pas pris en compte, donc la durée de vie du système peut ne pas être optimisée [152].

Les solutions retenues dans la littérature sont basées sur l'utilisation de différentes fonctions de coût associées à la charge ou à la décharge des éléments, qui déterminent un problème d'optimisation. Différents algorithmes sont utilisés pour calculer la solution du problème d'optimisation. Ceux-ci déterminent la priorité et la référence de puissance de chaque élément qui garantit l'utilisation la plus économique du système de stockage d'énergie pendant chaque période d'intégration. Dans le cas d'applications la connexion au réseau, l'interaction entre le réseau et le système hybride est également prise en compte. Pour cette raison, les pertes ou les avantages lors de l'achat ou de la vente d'énergie à partir du réseau sont également pris en compte.

#### 5.4.4. Stratégies incluant des facteurs de décision techniques et économiques

Ce type de stratégie cherche à augmenter la performance du système, en fonction de l'offre appropriée à la demande. Des critères techniques et économiques sont pris en compte pour augmenter la durée de vie de l'équipement et réduire les coûts de maintenance. Cette stratégie a une solution optimale d'un point de vue technique et économique, par rapport aux systèmes alternatifs de génération traditionnels. Les solutions retenues dans la littérature sont basées sur des problèmes d'optimisation non linéaires, utilisant le coût et la dépréciation des équipements intégrés dans une fonction multi-objective. La solution de ce problème par différentes techniques, détermine la puissance de référence fournie par chaque élément dans chaque itération, assurant l'équilibre de puissance avec des performances optimales du système. Comme dans les cas précédents, la solution implémentée dans les cas extrêmes de dépassement important ou de déficit énergétique dépendra de la topologie [152].

Le principal avantage de ces stratégies est la réponse optimale du système d'un point de vue technique et économique. Les paramètres de durée de vie et de performance sont pris en compte pour définir la fonction de coût. D'autre part, des algorithmes d'optimisation complexes sont utilisés, ce qui augmente la complexité pour développer des applications réelles.

La principale différence entre les stratégies proposées est basée sur les contraintes techniques, ainsi que sur l'algorithme d'optimisation utilisé pour résoudre le problème d'optimisation non linéaire.

### 5.5. Objectif de l'étude

Une étude techno-économique développée est appliquée sur le système d'énergie hybride étudié (PV/éolien/batterie) connecté au réseau électrique, en vue d'obtenir une solution optimale concernant le dimensionnement et le coût du système étudié durant sa durée de vie. Une opération de stratégie d'énergie est proposée dont le but de gérer et de contrôler l'énergie entre le système hybride, la batterie et le micro-réseau selon deux stratégies qui sont définies par : stratégie de stockage et stratégie de vente d'énergie, avec la prise en considération de la fluctuation de la tension.

Une méthode métaheuristique par essaim de particules (PSO) est utilisée pour traiter le problème d'optimisation formulé et trouver leur solution optimale. Une comparaison est effectuée entre cette méthode et d'autres techniques développées et améliorées à base du PSO. La simulation de ce processus d'optimisation est réalisée sous environnement Matlab.

#### 5.5.1. Vue globale du système hybride connecté au réseau électrique

La figure 5.1 illustre un système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) raccordé au réseau électrique. Ces systèmes hybrides sont reliés entre eux à travers un bus continu, ou un hacheur survolteur (boost)

est connecté avec le système PV, un redresseur (AC/DC) est utilisé et connecté avec un hacheur survolteur pour le système éolien. Le système de stockage d'énergie est combiné avec un hacheur bidirectionnel CC/CC pour régler la tension du bus continu. Ensuite, un onduleur (CC/CA) est relié entre le bus continu et le micro-réseau dans le but d'obtenir une tension alternative.

La stratégie de la gestion d'énergie de ce système permet d'injecter la puissance produite par le système hybride (PV/éolien) au micro-réseau. Le système de stockage d'énergie a pour rôle de charger et stocker l'énergie produite par le système d'énergie (PV/éolien), et décharger cette énergie pour le vendre au micro-réseau selon le besoin.

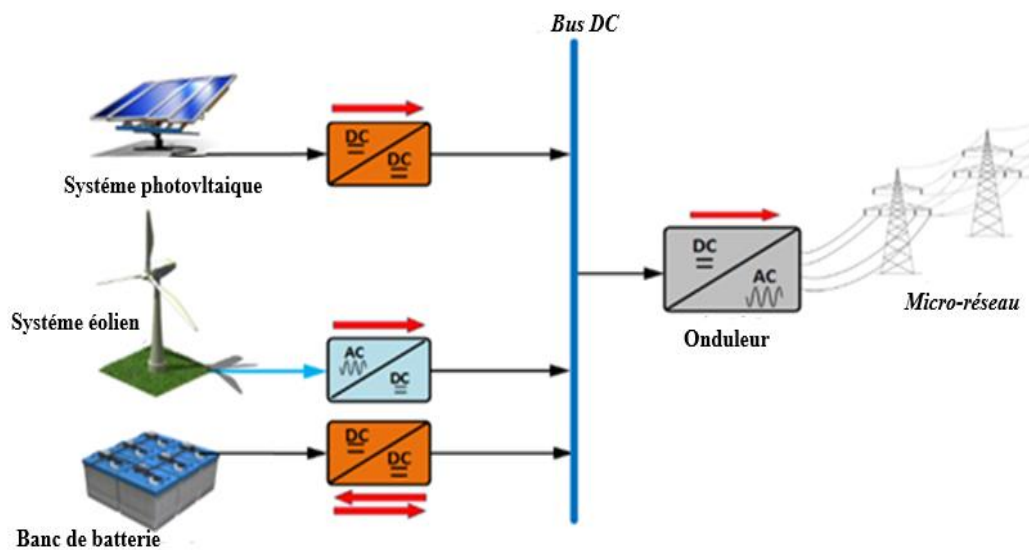


Figure 5.1. Modèle du SEH connecté au réseau.

## 5.5.2. Modèle du système hybride

### 5.5.2.1. Panneau photovoltaïque

On trouve qu'il existe plusieurs modèles du panneau PV dans la littérature avec différent circuit de configuration et paramètres. Dans ce contexte, le modèle PV utilisé dans cette étude est déterminé par l'expression suivante [158] :

$$P_{pv} = P_{\max,ref} \times \frac{G_T}{G_{T_{ref}}} [1 + \gamma (T_c - 25)] \quad (5.1)$$

Avec :  $G_T$  est le rayonnement solaire dans un pas de temps actuel ( $W/m^2$ ),  $G_{T_{ref}}$  est le rayonnement solaire à la référence de  $1000W/m^2$ ,  $P_{pv}$  est la puissance de sortie du panneau PV (kW),  $P_{\max,ref}$  est la puissance maximale du panneau PV à  $G_{T_{ref}}$  (kW),  $\gamma$  est la température constante et égale à  $-0.0035C^\circ$ ,  $T_c$  est la température ambiante.

### 5.5.2.2. Système éolien

Le modèle éolien est défini par l'expression de la puissance de sortie suivante [159] :

$$P_w = \begin{cases} 0 & v_w < v_{ci}, v_w > v_{co} \\ P_{w_{\max}} \times \left( \frac{v_w - v_{ci}}{v_p - v_{ci}} \right)^3 & v_{ci} \leq v_w < v_p \\ P_{w_{\max}} + \frac{P_{f0} - P_{w_{\max}}}{v_{c0} - v_p} \times (v_w - v_p) & v_p \leq v_w \leq v_{f0} \end{cases} \quad (5.2)$$

Où :  $P_{w_{\max}}$ ,  $P_{f0}$  sont les puissances de sortie nominale et à vitesse de coupure (kW),  $P_w$  est la puissance de sortie de l'éolienne (kW),  $v_{ci}$ ,  $v_{co}$ ,  $v_p$  sont respectivement les vitesses de vent à coupure, découpure et nominale (m/s),  $v_w$  est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne, comme définis dans l'équation (5.3) :

$$v_w = v_{w_{\text{measure}}} \times \left( \frac{h_{\text{hub}}}{h_{\text{measure}}} \right)^\alpha \quad (5.3)$$

$\alpha$  Un coefficient constant, qui varie en fonction de la température, le temps de la journée, la saison et la pression avec un taux égale à 0,14 [160].

La puissance produite par les générateurs hybride photovoltaïque et éolien est donnée par :

$$P_{\text{hyb}} = N_w \times \left( \frac{P_{wr}}{P_{gw}} \right) \times P_w + N_{pv} \times \left( \frac{P_{pr}}{P_{gp}} \right) \times P_{pv} \quad (5.4)$$

D'où :  $P_{\text{hyb}}$  est la puissance produite par le système hybride (kW),  $N_w$ ,  $N_{pv}$  sont les nombres d'unités du système photovoltaïque et éolien,  $P_{wr}$ ,  $P_{pr}$ ,  $P_{gw}$ ,  $P_{gp}$  sont les puissances nominales et générés du système PV et éolien (kW).

### 5.5.2.3. Système de stockage

L'intégration d'un système de stockage d'énergie (BESS) à un système hybride d'énergie renouvelable (PV/éolien) est très important et possède un grand intérêt. L'avantage d'utiliser la batterie dans cette étude est de gérer la gestion d'énergie entre le système hybride et le micro-réseau, et atténuer les perturbations de tension dans le micro-réseau.

Notons que le grand rôle du BESS est de réduire les perturbations de tension dont le but d'assurer la stabilité du système et pour garantir ce rôle, on calcule la puissance moyenne produite par le système hybride, et est estimée par:

$$\overline{P}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{hyb})_i \quad (5.5)$$

$\overline{P}_a$  Est la puissance moyenne du système hybride (PV/éolien) en kW,  $n$  est le nombre d'observation.

L'énergie de la batterie est écrite sous la forme suivante :

$$E = (P_{hyb} - \overline{P}_a) * \Delta t \quad (5.6)$$

$E$  Représente l'énergie de la batterie en Wh.

Le maximum et le minimum de l'état de charge de la batterie est calculé par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} SOC_{\min} &= \frac{E_{\min}}{N_b C_{db}} \\ SOC_{\max} &= 1 - \left( \frac{E_{\max}}{N_b C_{db}} \right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Où :  $SOC_{\min}$ ,  $SOC_{\max}$  sont respectivement le minimum et le maximum l'état de charge de la batterie,  $N_b$  est le nombre de batterie,  $C_{db}$  est la capacité de la batterie (kWh),  $E_{\max} = \max(E)$ ;  $E_{\min} = \min(E)$  sont respectivement l'énergie minimale et maximale.

#### 5.5.2.4. Fluctuation de la tension

Les systèmes d'énergies renouvelable comme le photovoltaïque et l'éolienne peuvent entraîner une fluctuation de tension car ils sont influencés par les conditions climatiques à cause des variations dans l'éclairement solaire et même dans le vent. Cette perturbation de tension peut conduire à une instabilité au micro-réseau. La variation de tension peut être estimée en pour cent (%) par la relation:

$$dv = \frac{R\Delta P + X\Delta Q}{V^2} \times 100\% \quad (5.8)$$

Avec :  $R$ ,  $X$  sont la résistance et l'inductance de la ligne du réseau en ( $\Omega$ ),  $\Delta P$  and  $\Delta Q$  sont les variations de la puissance active et réactive en (kW),  $V$  est la tension du réseau (V).

### 5.6. Opération de stratégie d'énergie

Une opération de stratégie d'énergie est proposée et appliquée sur le système hybride (PV/éolien/batterie) raccordé au micro-réseau, en vue d'optimiser techniquement et économiquement ce système, et gérer l'énergie entre le système hybride et le réseau. Ce processus de gestion d'énergie traite deux stratégies, la première permet le stockage d'énergie et la seconde s'intéresse à la vente d'énergie. Une estimation de l'état de charge de la batterie est calculée pour chaque heure pendant une journée dans le but de réduire les perturbations de tension.

### 5.6.1. Stratégie du stockage

Dans cette stratégie, la batterie BESS est chargée de l'énergie par le producteur du système d'énergie hybride (PV/éolien) lorsque le prix d'achat du micro-réseau est inférieur au prix maximal requis ( $C_{gmax} = 0,3\$ / kWh$ ). Dans ce cas, la puissance de charge de la batterie peut être exprimée par les relations suivantes :

$$P_{ch,lim}(t) = C_{db} N_b \frac{SOC_{max}(t+1) - SOC(t)}{\eta} \quad (5.9)$$

$$P_{ch}(t) = \bar{P}_a(t) \quad (5.10)$$

$$P_{ch}(t) = \min(P_{ch}(t), P_{ch,lim}(t)) \quad (5.11)$$

Lorsque l'état de charge de la batterie  $SOC(t)$  est inférieur au  $SOC_{min}(t+1)$ , la puissance de charge est donnée par :

$$P_{ch,min}(t) = C_{db} N_b \frac{SOC_{min}(t+1) - SOC(t)}{\eta} \quad (5.12)$$

$$P_{ch}(t) = \max(P_{ch}(t), P_{ch,min}(t)) \quad (5.13)$$

$$P_{ch}(t) = \min(P_{ch}(t), N_b C_{db} c_{ch}) \quad (5.14)$$

Alors, l'état de charge de la batterie est calculé par :

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \frac{\eta P_{ch}(t)}{C_{db} N_b} \quad (5.15)$$

### 5.6.2. Stratégie de vente

Cette stratégie consiste à vendre l'énergie stockée dans les batteries au micro réseau lorsque les prix d'achat du micro-réseau sont élevés que le prix maximum désiré ( $C_{gmax} = 0,3\$ / kWh$ ). Les expressions de la décharge d'énergie à travers la batterie est donnée par :

$$P_{dch,lim}(t) = C_{db} N_b \eta (SOC(t) - SOC_{min}(t+1)) \quad (5.16)$$

$$P_{dch}(t) = P_{dch,lim}(t) \quad (5.17)$$

Quand l'état de charge de la batterie  $SOC(t)$  est supérieur que  $SOC_{max}(t+1)$ , la puissance de décharge est décrite par les équations suivantes :

$$P_{dch,min}(t) = C_{db} N_b \frac{(SOC(t) - SOC_{max}(t+1))}{\eta} \quad (5.18)$$

$$P_{dch}(t) = \max(P_{dch}(t), P_{dch,min}(t)) \quad (5.19)$$

$$P_{dch}(t) = \min(P_{dch}(t), N_b C_{db} c_{dch}) \quad (5.20)$$

Avec  $c_{ch}$ ,  $c_{dch}$  sont les limites de charge et de décharge de la capacité de la batterie,  $\eta$  est le rendement de charge et de décharge de la batterie et pris comme valeur égale à 0.9.

L'état de charge de la batterie est déterminé par l'équation suivante :

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{P_{dch}(t)}{C_{db} N_b \eta} \quad (5.21)$$

La puissance totale du système hybride (PV/éolien/batterie) est estimée à travers l'équation suivante :

$$P_{tot}(t) = \bar{P}_a(t) + P_{dch}(t) - P_{ch}(t) \quad (5.22)$$

### 5.7. Méthode d'optimisation

On retrouve parmi les méthodes heuristiques, certains algorithmes qui possèdent un principe générique adaptable et qui s'applique à plusieurs problèmes d'optimisation, on l'appelle les métaheuristiques. L'optimisation par essaim des particules PSO dérive de la descente stochastique. Elle s'inspire fortement des relations grégaires des oiseaux migrateurs qui doivent parcourir des longues distances et qui doivent donc optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, comme par exemple la formation en V montré dans la figure 5.2. L'idée de s'inspirer des systèmes naturels pour proposer des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation a donné naissance à une sous classe des métaheuristiques, ce sont des métaheuristiques basées sur l'intelligence par essaim (en anglais : Swarm Intelligence). C'est une des métaheuristiques à base de population de solutions inspirées par une analogie avec l'éthologie.



**Figure 5.2.** Trajectoire de particule.

L'optimisation par essaim de particules est une jeune métaheuristique. Elle imite le comportement social des animaux évoluant en groupe comme les oiseaux, les abeilles et les poissons. Le PSO a été proposé en 1995 par KENNEDY et EBERHART pour la résolution des problèmes d'optimisation continus. La simplicité et la performance de cette méthode ont suscité l'intérêt de

plusieurs communautés de chercheurs qui ont mené des études d'optimisation et d'application de cette métaheuristique pour la résolution de plusieurs problèmes d'optimisation continus et/ou discrets. Par conséquent, plusieurs alternatives d'algorithme originel du PSO ont été proposées dans la littérature afin d'améliorer sa performance pour la résolution de différents problèmes.

### 5.7.1. Origine de l'idée de l'optimisation par essaim des particules

L'idée de PSO trouve ses racines dans les années 80. Précisément en 1983, lorsque REEVES [161] a essayé de résoudre le problème de rendu des images afin de simuler les phénomènes naturels en utilisant l'outil informatique pour créer des scènes animées. Dans le cadre de son travail, REEVES a implémenté un système des particules qui œuvrent ensemble pour simuler un objet flou (nuage, explosion...). Le modèle proposé par REEVES considère que chaque particule est caractérisée par une position dans l'espace de recherche et une vitesse de déplacement. En effet, les particules de l'essaim se déplacent en fonction de leurs positions courantes et leurs vitesses qui seront adaptées au cours de la recherche.

D'autre part, CRAIG REYNOLDS [162] a été intrigué par l'organisation et l'esthétique du comportement social des oiseaux. Il a tenté d'améliorer l'idée de REEVES, en rendant le comportement du groupe des particules plus dynamique et plus organisé.

REYNOLDS a ajouté la notion d'orientation et la notion de communication inter-particules: chaque particule doit rester proche des autres particules de l'essaim comme elle doit éviter d'entrer en collision avec ses congénères. C'est la raison pour laquelle, chaque particule doit avoir conscience de la position des autres particules du groupe. Suite à sa recherche, REYNOLDS a découvert que l'implémentation d'un modèle simulant le comportement de particules tel qu'il est en réalité n'est pas faisable. En fait, il a découvert que son modèle engendre une exécution très complexe surtout avec une population de grande taille. Afin de pallier à ce problème, REYNOLDS a proposé l'utilisation de la notion du voisinage. De leurs parts, HEPPNER et GRENANDER [163] ont appréciés la manière de volées d'oiseaux. Ils ont établi une recherche sur les différentes règles permettant à un ensemble d'agents de se communiquer d'une manière très simple et de produire un comportement social imprévisible, bien organisé et intelligent.

En 1995, KENNEDY et EBERHART basés sur les idées et les études de REEVES, REYNOLDS et surtout les résultats de HEPPNER et GRENANDER afin de comprendre la stratégie de recherche de nourriture et d'affrontement des prédateurs que l'on retrouve chez les groupes d'animaux tels que les bancs de poissons, les volées d'oiseaux ou les essaims d'insectes. Le fruit des recherches de KENNEDY et EBERHART était la proposition de la métaheuristique d'optimisation par essaim des particules dont le principe sera décrit dans ce qui suit.



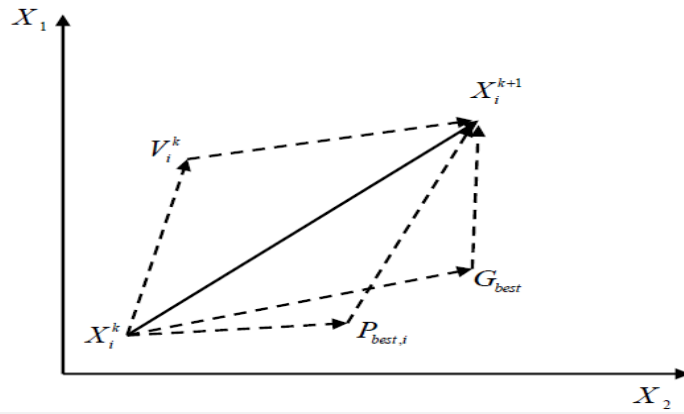
### 5.7.2. Optimisation par essaim des particules (PSO)

L'algorithme PSO est inspiré du comportement social d'animaux évoluant en essaim, tels que les poissons qui se déplacent en bancs ou les oiseaux migrateurs. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale de sa situation dans l'essaim. L'intelligence globale de l'essaim est donc la conséquence directe des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim. La performance du système entier est supérieure de la somme des performances de ses parties. KENNEDY et EBERHART sont inspirés de ces comportements sociaux pour créer l'algorithme PSO. Contrairement aux autres algorithmes évolutionnaires tel que l'algorithme génétique où la recherche de la solution optimale évolue par compétition entre les individus en utilisant des opérateurs de croisements et de mutations, le PSO utilise plutôt la coopération entre les individus.

La méthode PSO met en jeu un ensemble d'agents pour la résolution d'un problème donné. Cet ensemble est appelé essaim. L'essaim est composé d'un ensemble des membres, ces derniers sont appelés particules. Les particules de l'essaim représentent des solutions potentielles au problème traité. L'essaim des particules survole l'espace de recherche, en quête de l'optimum global.

Dans l'algorithme de PSO chaque solution aléatoire du problème à résoudre correspond à une particule artificielle qui se déplace avec son genre dans le super organisme. Les particules dans une population adapter en retournant stochastiquement vers des régions prospères précédemment dans l'espace de recherche, et sont influencés par les succès de leurs voisins topologiques. En d'autres termes, chaque individu dans l'essaim des particules représente une solution potentielle qui déplace sa position dans l'espace de recherche et met à jour sa vitesse en fonction de sa propre expérience de volet celle de son voisin, visant une meilleure position pour lui-même au prochain mouvement. La définition de PSO se présente par les étapes suivantes :

- Chaque particule individuelle contient les propriétés suivantes : une position actuelle dans l'espace de recherche  $x_i$ , une vitesse actuelle  $v_i$ , et une meilleure position personnelle dans l'espace de recherche  $P_i$ .
- La meilleure position personnelle  $P_i$  correspond à la position dans l'espace de recherche  $x_i$ , où la particule  $i$  présente la plus petite erreur tel que déterminé par la fonction objectif (fitness), en supposant qu'une tâche de minimisation.
- La meilleure position globale notée  $G$  représente la position qui donne la plus basse erreur parmi les toutes  $P_i$ 's.



**Figure 5.3.** Mise à jour du PSO pour la position suivante dans un plan de 2 dimensions.

Pour atteindre le point optimal, les particules doivent mettre à jour leurs prochains déplacements selon leurs propres vitesses, leurs meilleures performances et la meilleure performance de leur meilleur informateur comme indiqué dans la figure 5.3 et formulé comme suit :

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 \cdot rand_1 (P_{best,i} - X_i^k) + c_2 \cdot rand_2 (G_{best} - X_i^k) \quad (5.23)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (5.24)$$

Où,  $V_i^k$  est la vitesse de la particule à  $k^{\text{th}}$  itération,  $X_i^k$  est la position actuelle de la particule à la  $k^{\text{th}}$  itération,  $\omega$  est le poids d'inertie,  $c_1$  et  $c_2$  sont les facteurs de pondération des termes d'accélération stochastique, qui tirent chaque particule vers les positions  $P_{best,i}$  et  $G_{best}$ ,  $rand_1$  et  $rand_2$  sont deux fonctions aléatoires dans l'intervalle  $[0,1]$ ,  $P_{best,i}$  est la meilleure expérience de  $i^{\text{ème}}$  particule qui est enregistré et  $G_{best}$  est la meilleure particule parmi l'ensemble de la population.

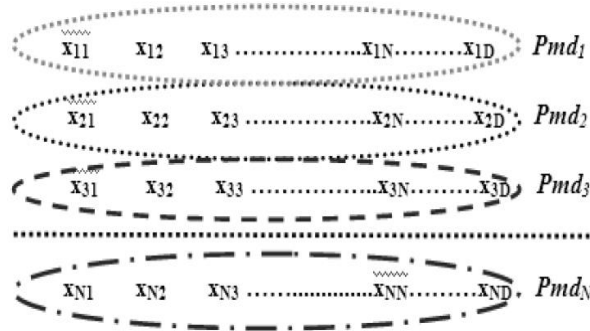
L'équation (5.23) est utilisée pour le calcul de la vitesse du  $i^{\text{ème}}$  particule étant donné la vitesse précédente de la particule, la distance entre les meilleures particules précédentes et la position actuelle, la dernière est la distance entre la position de la meilleure particule dans l'essaim et la position de la particule. Le poids d'inertie  $\omega$  est utilisé pour permettre une particule d'équilibrer entre les explorations globales et locales, nécessitant donc moins d'itération en moyenne pour trouver une solution suffisamment optimale.  $\omega$  est souvent décroît linéairement environ 0.9 à 0.4 pendant simulation comme montré dans les développements précédents. En général, le poids d'inertie est réglé selon l'équation suivante :

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \cdot iter \quad (5.25)$$

Où :  $iter$ ,  $iter_{\max}$  sont les nombre actuel et maximal d'itérations.

### 5.7.3. Méthode par essaim des particules à convergence rapide

L'optimisation par essaim de particule rapide (FCPSO : Fast Convergence Particle Swarm Optimisation) a été améliorée la performance du PSO en introduisant un nouveau paramètre nommé la dimension particulaire moyenne ( $Pmd$ ). La méthode PSO peut converger rapidement, mais susceptible de tomber dans des minima locaux facilement. Pour résoudre ce problème, une étude a été faite en tenant compte les développements suivants [164].



**Figure 5.4.** Calcul de la dimension particulaire moyenne pour N particules [164].

Après les mises à jour de l'essaim des particules et à partir de la génération de  $g$  à  $g+1$  en dehors de la suite de la  $P_{best,i}$  et  $G_{best}$ , la particule pourrait suivre qui choisit parmi l'essaim des particules.

Le troisième paramètre  $Pmd_i$  des particules  $i^{ème}$  et l'équation de la vitesse sont décrits par les équations suivantes [164] :

$$Pmd_i = (x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iD}) / D \tag{5.26}$$

Où :  $D$  est la dimension de particule dans l'essaim.

$$V_i^{k+1} = \omega.V_i^k + c_1.rand_1(P_{best,i} - X_i^k) + c_2.rand_2(G_{best} - X_i^k) + c_3.rand_3(Pmd_i - X_i^k) \tag{5.27}$$

Donc  $c_3$  est un coefficient constant tel que :  $(c_1 + c_2 + c_3) \geq 4$ .

Après l'inclus du paramètre  $Pmd_i$  à la formule de la vitesse,  $P_{best,i}$ ,  $G_{best}$  et  $Pmd_i$  donne des informations à la génération suivante simultanément et augmente la quantité d'informations. Ensuite, il est possible d'obtenir rapidement la solution. Dans le même temps, le facteur de pondération proposé du  $Pmd_i$  est petit, ce qui est équivalent à la perturbation des informations et augmente la diversité des particules.  $G_{best}$  est utilisé pour améliorer la convergence, mais réduit la diversité de la population qui conduit à des minima locaux, et le paramètre  $Pmd_i$  est capable de déplacer les particules vers une meilleure position et de réduire l'attraction du  $G_{best}$  à un minimum local [164].

### 5.7.4. Méthode de PSO avec Coefficients d'Accélération Variable

La technique de PSO avec le temps variant le poids d'inertie fournit un bon emplacement de la solution à un taux significativement rapide. L'idée de la méthode du temps variable d'accélération de coefficients (TVAC) est d'améliorer la recherche globale dans la première partie de l'optimisation et à encourager les particules à converger vers l'optimum global à la fin de la recherche. Dans ce cas, les coefficients cognitif et social  $c_1$ ,  $c_2$  ne sont plus constants mais variables en fonction de génération (itération), autrement dit dans le temps dont le but est de guider l'exploration tantôt vers la direction de l'expérience de l'individu (coefficient cognitif dominant) tantôt vers la direction de l'expérience de groupe (coefficient social dominant). Enfin l'interaction de ces deux facteurs dirige l'exploration vers la solution voulue [165].

Cette technique permet de changer les coefficients d'accélération et avec le temps de telle sorte que le composant cognitif soit réduit tandis que le composant social est augmenté comme les revenus de recherche. Les coefficients d'accélération sont exprimés par l'expression suivante :

$$\begin{cases} c_1 = (c_{1_f} - c_{1_i}) \frac{iter}{iter_{max}} + c_{1_i} \\ c_2 = (c_{2_f} - c_{2_i}) \frac{iter}{iter_{max}} + c_{2_i} \end{cases} \quad (5.28)$$

Avec :  $c_{1_f}$ ,  $c_{1_i}$ ,  $c_{2_f}$ ,  $c_{2_i}$  sont les coefficients sociaux cognitive respectivement d'accélération initial et final.

La notion de temps variant le poids d'inertie est suggérée de réduire linéairement. Le poids d'inertie est formulé comme suit [166] :

$$\omega = (\omega_{max} - \omega_{min}) \left( \frac{iter_{max} - iter}{iter_{max}} \right) + \omega_{min} \quad (5.29)$$

### 5.7.5. Méthode de FC \_ VACPSO

Cette méthode développée à base de PSO est proposée dans le but d'améliorer et d'obtenir une solution optimale avec robustesse de l'algorithme standard du PSO. C'est la combinaison des deux méthodes de convergence rapides et de coefficients d'accélération variable à base de PSO, il est introduit le nouveau paramètre ( $pmd$ ) dans l'équation de la vitesse cité dans (5.27), en prend en considération le temps variée des coefficients d'accélération  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  comme montré dans l'équation (5.28). Le poids d'inertie est calculé à travers l'équation (5.29) et les coefficients d'accélération sont variés selon la formule suivante :

$$\begin{cases} c_1 = c_{1i} + (c_{1f} - c_{1i}) \frac{iter}{iter_{max}} \\ c_2 = c_{2i} + (c_{2f} - c_{2i}) \frac{iter}{iter_{max}} \\ c_3 = c_{3i} + (c_{3f} - c_{3i}) \frac{iter}{iter_{max}} \end{cases} \quad (5.30)$$

### 5.8. Problème d'optimisation

Une optimisation économique est effectuée sur le système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie), dont le but d'obtenir une solution optimale comprend le dimensionnement et le coût du système. La fonction objective développée est basée sur les coûts du système hybride et de micro-réseau durant 20 ans de durée de vie. Les coûts de capital, de remplacement et de maintenance de chaque système est donnée par l'expression suivante :

$$C_s = \sum_i^n N_i \times (CC_i + K \times RC_i + PWA \times MC_i) \quad (5.31)$$

Où :  $C_s$  est le coût net présent des composants du système,  $n$  est le nombre des sources d'énergies renouvelables,  $N$  est le nombre d'unité ou de la capacité en (kW) pour chaque unité,  $CC$ ,  $RC$ ,  $MC$  sont les coûts de capital, de remplacement et d'opération & maintenance des composants. Le coût de remplacement représente l'échange de coût pour chaque composant dans sa fin de vie, avec  $K$  définit la constante correspond à ce coût et calculé par [167] :

$$K = \sum_{i=1}^{L_1} \frac{1}{(1+i_r)^{k \times L_2}} \quad (5.32)$$

Avec :  $L_1$ ,  $L_2$  sont respectivement nombre de durée de vie et le remplacement des SEH pour la durée de vie du projet,  $i_r$  est le taux d'intérêt réel et est égal à 6%,  $PWA$  est un coefficient appliqué pour convertir le coût total de fonctionnement et d'entretien au coût présent comme montrée dans l'équation (5.33) [168] :

$$PWA = \frac{(1+i_r)^R - 1}{i_r (1+i_r)^R} \quad (5.33)$$

Le coût du réseau est estimé par la formule suivante :

$$C_{G_i} = P_{tot_i} \times C_{g_i} \quad (5.34)$$

Avec  $C_g$  sont les prix d'achat du micro-réseau et sont mentionnées dans [169]. Le cdbénéfice est exprimé par :

$$B = C_s - C_G \tag{5.35}$$

La solution du problème d'optimisation considère certaines contraintes, à savoir :

$$\begin{aligned} C_{db} \cdot c_{dch} &\leq C_{db} \leq C_{db} \cdot c_{ch} \\ SOC_{min}(t) &< SOC(t) < SOC_{max}(t) \\ SOC(t+1) &< SOC(t) \\ N_i &> 0 \end{aligned} \tag{5.36}$$

La figure 5.5 illustre l'organigramme qui clarifie l'étude techno-économique du système hybride (PV/éolien/batterie) et le micro-réseau.

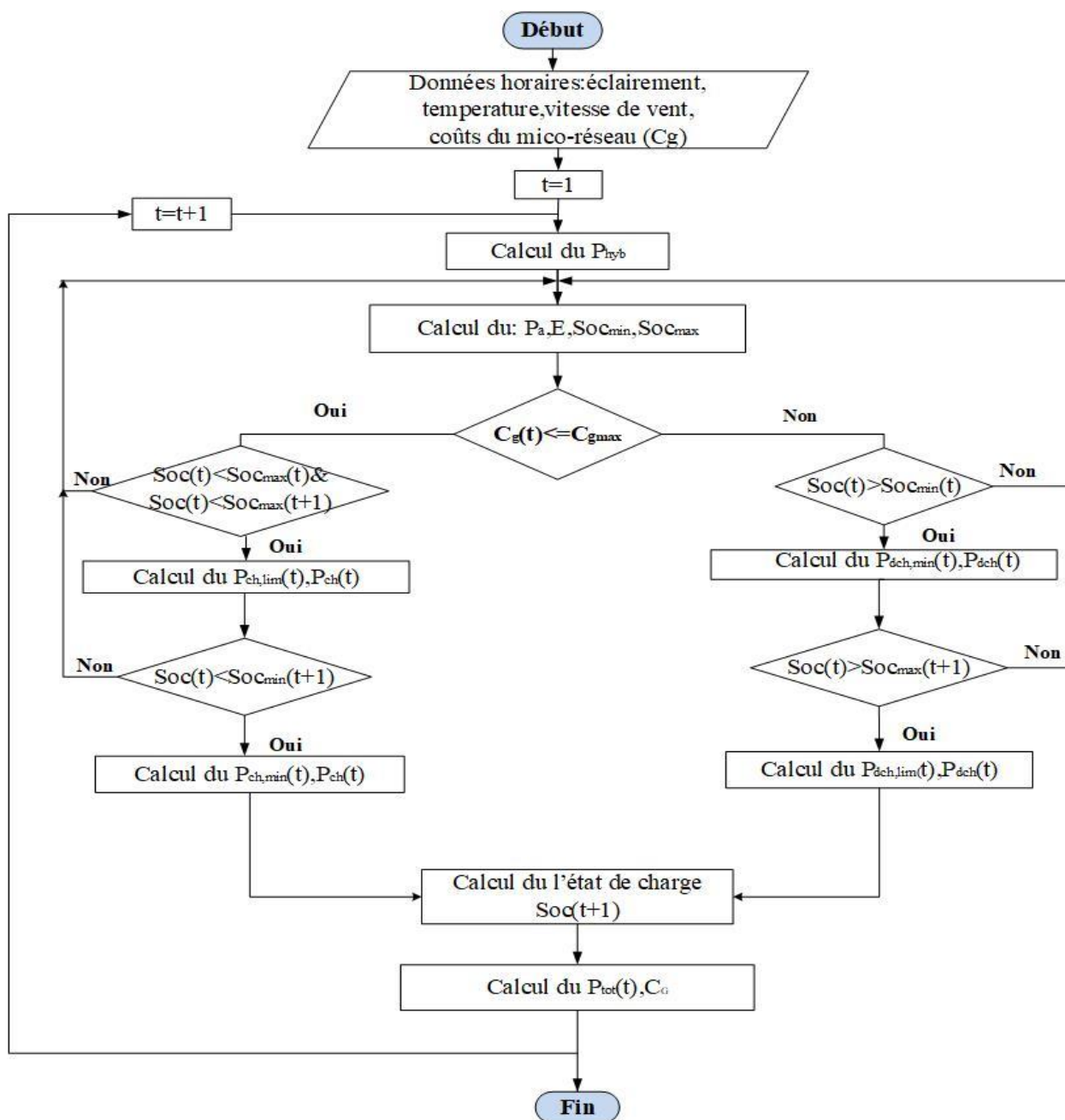
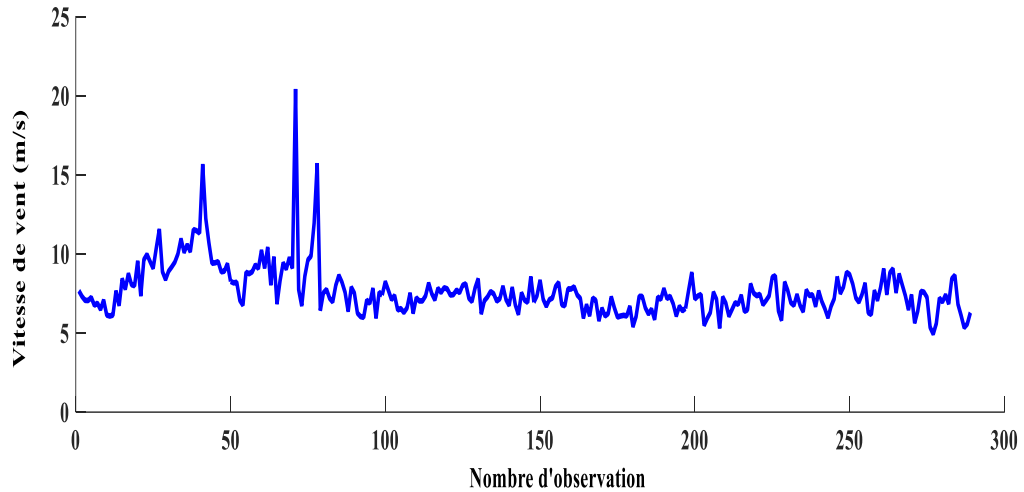


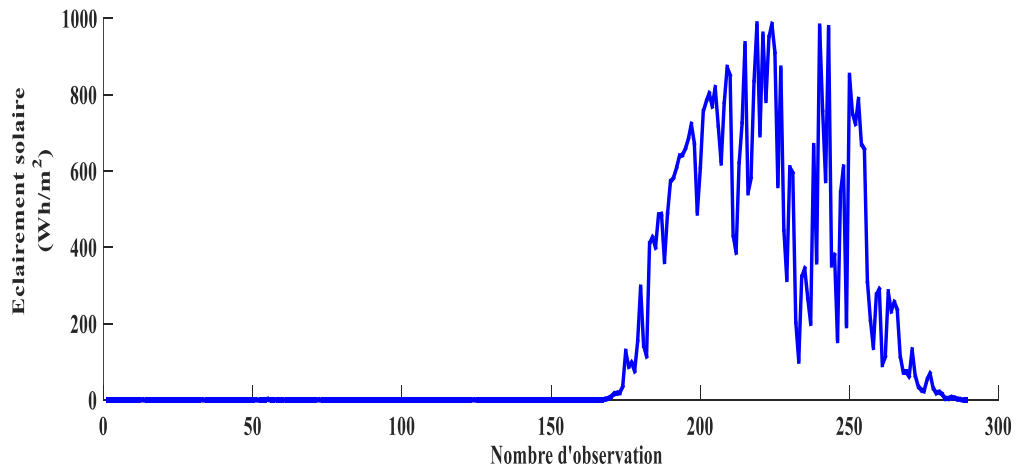
Figure 5.5. Organigramme de gestion d'énergie.

## 5.9. Résultats de simulation

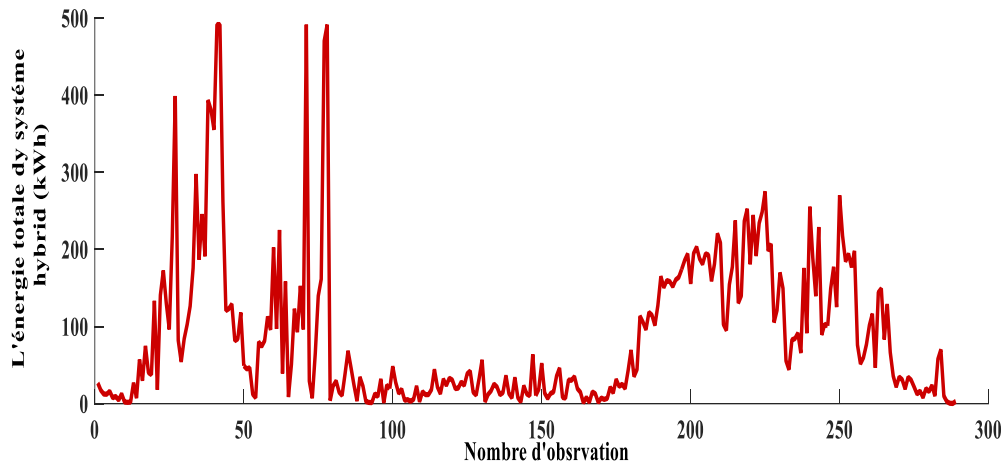
Dans cette étude, la méthode PSO et les méthodes améliorées à base de PSO sont appliquées pour simuler le problème d'optimisation du SEH connectée au micro-réseau, y a compris le système de stockage d'énergie dans le but d'obtenir une meilleure solution optimale. La simulation est réalisée sous environnement Matlab. Les données horaires du rayonnement solaire et de la vitesse du vent pendant une journée du mois de Janvier de l'année 2014 pour chaque heure sont utilisées dans cette simulation. Une discussion sur les résultats obtenus sera détaillée dans ce qui suit.



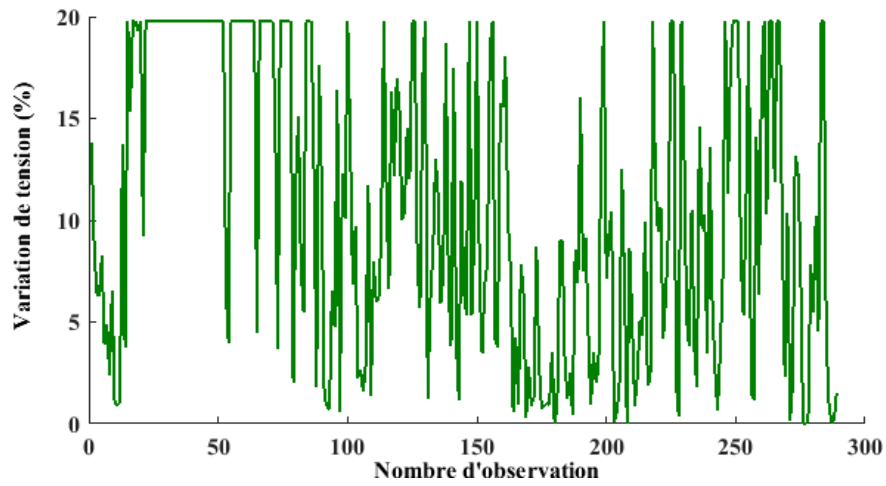
**Figure 5.6.** Profile de la vitesse du vent durant une journée.



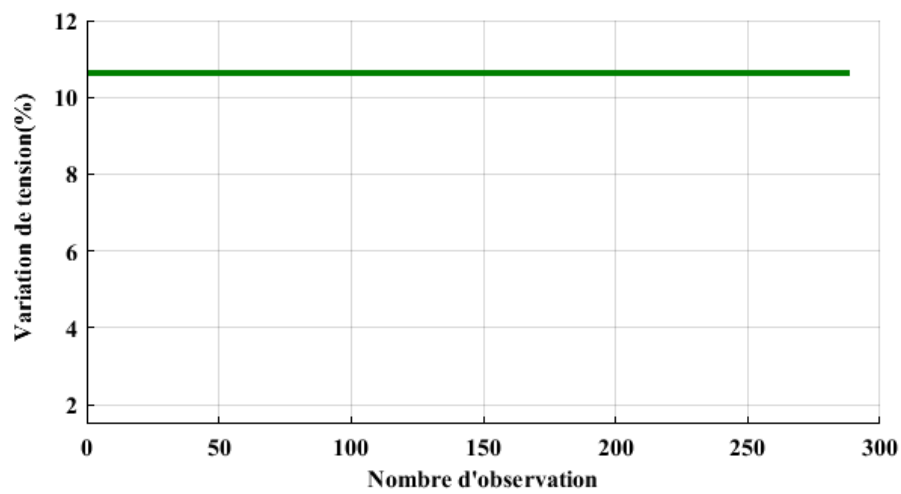
**Figure 5.7.** Profile de l'irradiation solaire durant une journée.



**Figure 5.8.** L'énergie totale du système hybride durant une journée.

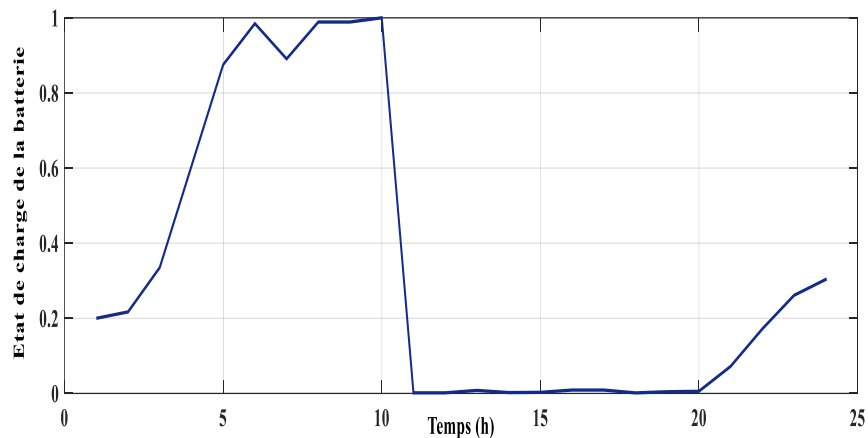


**Figure 5.9.** Variation de la tension sans l'intégration de la batterie.

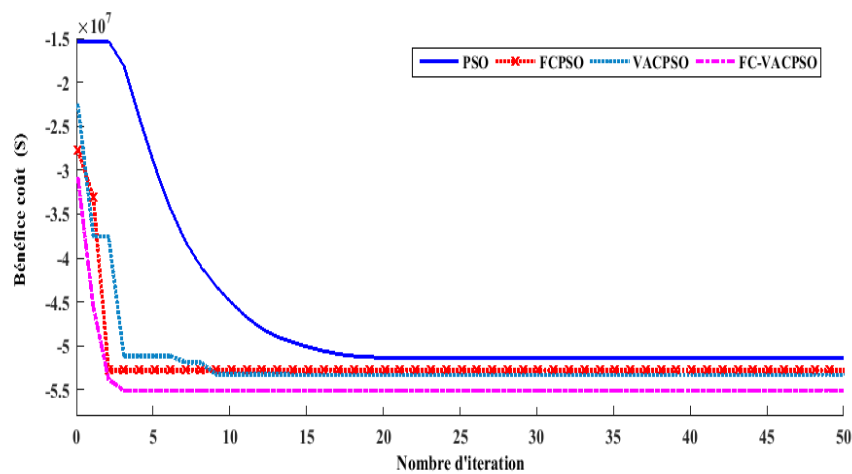


**Figure 5.10.** Variation de la tension avec l'intégration de la batterie.





**Figure 5.11.** Etat de charge de la batterie.



**Figure 5.12.** Convergence des méthodes métaheuristiques.

La solution optimale du système d'énergie hybride du panneau photovoltaïque, de l'éolienne et de la batterie concernant le dimensionnement et le coût de bénéfice résolu par les méthodes métaheuristiques appliquées sont montrées dans le tableau 5.1.

**Tableau 5.1.** Solution optimale du système hybride.

Méthodes	$N_{pv}$	$N_w$	$N_b$	Coût de Bénéfice (MUS\$)
PSO	31	11	08	51.3
FCPSO	15	23	20	52
VACPSO	18	20	28	53.0
FC-VACPSO	24	19	24	55

### 5.9.1. Analyse de sensibilité

Une étude d'analyse est réalisée concernant le type et le coût de batterie. Dans ce cas, quatre types de batteries ont été utilisées tels que : le plomb-acide, nickel-cadmium, le lithium-ion et le flux redox au vanadium ou les prix de ces types des batteries [170] sont mentionnés dans l'annexe A. L'objectif de cette étude est d'augmenter 5 fois le prix d'achat des batteries et l'appliquer au problème

d'optimisation en pris en considération le cas de l'état de charge de la batterie, dont le but de démontrer l'effet d'utiliser la batterie dans l'analyse techno-économique. A cet effet, deux cas ont été proposée, dans le premier cas, l'état de charge a été calculé pour chaque heure pendant une journée. Par contre dans le deuxième cas, l'état de charge a été considéré comme une donnée constante avec une valeur maximale et minimale égale à 1 et 0 respectivement. Les résultats obtenus ont montré l'analyse étudié entre les deux cas proposés concernant le dimensionnement du système hybride (PV/Wind/batterie) et le coût de profite, tel que mentionnée dans les tableaux 5.2 et 5.3.

**Tableau 5.2.** Etat de charge variable –Cas 1-

Type de batteries	Prix (\$/kWh)	N <sub>pv</sub>	N <sub>w</sub>	N <sub>b</sub>	Coût de Bénéfice (MUS\$)
Li-ion	1500	22	08	60	38.3
	1500x5	04	46	96	77.0
Ni-Cd	1200	11	21	44	49.8
	1200x5	09	09	32	27.0
VRB	600	25	22	56	69.0
	600x5	05	33	28	62.8
Lead-acid	300	49	05	44	60.6
	300x5	06	09	40	26.6

**Tableau 5.3.** Etat de charge constant –Cas 2-

Type de batteries	Prix (\$/kWh)	N <sub>pv</sub>	N <sub>w</sub>	N <sub>b</sub>	Coût de Bénéfice (MUS\$)
Li-ion	1500	22	08	60	36.1
	1500x5	04	46	96	79.0
Ni-Cd	1200	05	16	08	34.5
	1200x5	09	09	32	26.4
VRB	600	26	22	56	67.0
	600x5	05	34	28	63.6
Lead-acid	300	31	25	08	76.0
	300x5	46	05	44	52.0

### 5.9.2. Discussion des résultats

Les profils de vent et de l'éclairement solaire durant une journée pour chaque heure sont illustrés dans les figure 5.6 et 5.7 d'où ils sont estimés en 5 minutes/5 minutes de temps, et ils ont choisis dans des bonnes conditions climatiques. L'énergie totale produite par le système hybride (PV/éolien) pour chaque heure durant une journée est démontrée dans la figure 5.8. A partir de cette figure, on visualise qu'une perturbation de tension est apparu. Dans ce cas, une étude a été achevée avec et sans la combinaison de la batterie avec le système hybride (PV/éolien) pendant une journée et une évaluation de la variation de la tension est calculée en pourcent comme mentionnée dans l'équation 5.8 et représenté dans les figures 5.9 et 5.10. D'après ces figures et ces résultats, on peut noter que l'intégration de la batterie de type lithium-ion avec le système d'énergie renouvelable hybride

(PV/éolien) est très important et elle a un grand rôle dans la réduction de la perturbation de tension. L'état de charge de la batterie a été calculé pour chaque heure pendant une journée et le résultat obtenu montre qu'il varie pendant les vingt-quatre heures dépend de la charge et de la décharge d'énergie comme été mentionné dans la figure 5.11. La figure 5.12 montre la convergence des différentes méthodes métaheuristiques utilisées tel que le PSO et les méthodes améliorées à base du PSO. On peut noter que la méthode améliorée FC-VACPSO donne une meilleure solution à propos de la convergence, le dimensionnement du système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) et le coût de prestation avec un prix de 55 MUS \$ par rapport aux autres méthodes comme indiquées dans le tableau (5.1). La performance de cette méthode est bien prouvée et donne une meilleure solution que le PSO et le FC-PSO et VAC-PSO techniques.

Une étude de sensibilité a été analysée sur le dimensionnement et le coût de prestation du système hybride (PV/ éolien /Batterie). En a pris en considération, des différents prix et types de batteries, les résultats de simulation montrent que le premier cas est meilleur que le second concernant le dimensionnement et le coût de bénéfice du système, en particulier pour le type de batterie Li-ion. Le type de batterie sélectionné et le premier cas déterminent leurs efficacités, et sont parfaites pour l'analyse de sensibilité et pour l'étude d'optimisation. L'augmentation du coût de prestation dépend de l'augmentation du dimensionnement du système hybride particulièrement le nombre de batterie. On trouve, quand le prix du type de batterie Li-ion est élevé, le nombre de dimensionnement de la batterie et le coût de bénéfice sont aussi augmentés et vice versa pour les autres types de batterie.

On peut conclure que la variation du dimensionnement du système hybride dépend du prix de la batterie, et l'augmentation du coût de prestation dépend de l'augmentation du nombre de dimensionnement du système hybride typiquement le nombre de batterie. Par conséquent, afin d'obtenir un meilleur dimensionnement avec un coût de prestation du système d'énergie hybride (PV /éolien/ batterie), ou même pour un autre système avec l'intégration d'un BESS, il est nécessaire de choisir un bon prix et type de batterie. On peut noter que l'état de charge (SOC) calculé chaque heure peut réduire la fluctuation de tension et il est meilleur que considéré constant.

## 5.10. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude techno-économique est appliquée sur le système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) connecté au micro-réseau, en considérant la perturbation de tension causée par le rayonnement solaire et la vitesse du vent. L'insertion du BESS avec le système hybride présente un grand avantage comme a été prouvé et démontré dans les résultats de simulation : elle réduit les fluctuations de tension, stocke l'énergie et consomme cette énergie lorsque le réseau besoin, on peut dire que la batterie joue un grand rôle dont elle gère l'énergie entre le système hybride et le micro-

réseau. Une nouvelle technique a été démontrée à travers deux stratégies qui ont été consacrées pour stocker et vendre l'énergie au réseau et définit l'état de charge de la batterie pour chaque heure pendant une journée dans le but de réduire la perturbation de tension. Les résultats de simulation montrent que le type de batterie Li-ion a une bonne performance dans l'étude d'optimisation, et il est meilleur que les autres types de batteries. Pour obtenir un meilleur dimensionnement avec un bénéfice pour le système hybride, il est souhaitable de choisir un prix raisonnable ainsi qu'un type de batterie.

Une méthode métaheuristique comme le PSO a été utilisée pour résoudre le problème d'optimisation du système hybride étudié avec le micro-réseau, et comparée à d'autres méthodes améliorées à base du PSO tel que FC-PSO, VAC-PSO et FC-VAC PSO. Les résultats de simulation montrent clairement que la méthode améliorée FC-VACPSO donne une meilleure convergence, un meilleur dimensionnement et un bon coût de prestation. Cette méthode prouve son efficacité et elle est meilleure par rapport aux autres méthodes.

On peut conclure que le système d'énergie hybride choisi (PV/éolien/batterie) dans cette étude permet de le considérer un système rentable et peut offrir un bénéfice durant sa durée de vie.

## Conclusions Générales et Perspectives

---

### 6.1. Contexte

L'utilisation des énergies renouvelables prend de nos jours une grande importance, presque dans tous les domaines. On trouve que l'exploitation de ces énergies concerne beaucoup plus les énergies PV et les éoliennes avec bien sûr un système de stockage d'énergie dépendent leur type. L'intégration de ces types d'énergies avec d'autre système d'énergie renouvelable ou non comme les énergies conventionnels constitue un système nommé « hybride », qui demeurent une solution optimale et qui donnent des avantages par rapport à un système PV pur ou éolien pur dépendent de beaucoup facteurs fondamentaux tels que: la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne et le champ photovoltaïque, la connexion au réseau etc....

### 6.2. Contributions

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'optimisation d'un système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie) raccordé au réseau électrique. La résolution de ce problème d'optimisation permet d'appliquer l'un des méthodes développés et nouvelle des méthodes métaheuristique, en vue d'obtenir un dimensionnement optimal avec un meilleur coût pour ce système hybride.

Dans un premier lieu, une phase de modélisation avec leur commande est réalisée pour chaque bloc du système hybride (PV/éolien/batterie) avec le réseau électrique. Le but des commandes appliquées au niveau des convertisseurs reliés à ce système hybride est d'extraire la puissance maximale pour le système photovoltaïque et le système éolien, assurer la tension du bus continu constante à travers le système de stockage d'énergie par un banc de batteries. La présence du réseau électrique exige d'étudier leur synchronisation. Cette dernière est assurée par un contrôle hystérésis qui est effectué entre le réseau et l'onduleur. Les résultats de simulation obtenus ont montré que ce contrôle montre son efficacité et la synchronisation du réseau a été achevée.

Ensuite, une étude techno-économique est proposée pour le système hybride (PV/éolien/batterie) connecté au micro-réseau, dont le but est d'obtenir un dimensionnement minimal avec un coût de prestation pour ce système. Dans ce cas, deux opérations de stratégie d'énergie ont été proposées dont le but de gérer l'énergie entre le système hybride et le micro-réseau. La première stratégie permet de stocker et de charger l'énergie dans le système de batterie. Par conséquent, la deuxième stratégie concerne la vente et la décharge de l'énergie stockée dans les batteries au micro-réseau en cas de besoin.

Les systèmes PV et éoliennes peuvent causée des variations dans l'éclairement solaire et dans la vitesse de vent qui sont affectés par les conditions métrologiques. Ces variations peuvent engendrer des perturbations de tension dans le réseau électrique qui peuvent engendrer le déséquilibre et le phénomène de Flicker. Pour éviter ces problèmes, une estimation de perturbation de tension est évaluée avec et sans la présence du système de stockage pour démontrer l'intégration et l'utilité du BESS dans cette étude.

Une méthode métaheuristique est utilisée dans ce travail pour résoudre le problème d'optimisation. Cet algorithme est appelé essaim de particule (PSO : Particle Swarm Optimization). Il est comparé à d'autres méthodes améliorées à base du PSO telles que : FCPSO (Convergence Rapide), VACPSO (Variable Accélération Coefficient) et la dernière méthode développée par l'hybridation de ces deux dernières méthodes nommée FC-VACPSO, dont le but d'obtenir une solution optimale. La méthode métaheuristique développée « FC-VACPSO » a prouvé son efficacité et elle est plus performante par rapport aux autres méthodes surtout côté convergence, et conduit à un meilleur dimensionnement avec un coût de bénéfice pour le système hybride étudié.

Une analyse de sensibilité a été étudiée pour le système hybride (PV/éolien/batterie) concernant le dimensionnement et le coût de prestation dont le but de démontré l'importance de la nouvelle technique suggérée au sein du système de stockage. Dans cette situation, deux cas ont été analysés considérant l'état de charge de la batterie, une fois est compté variable à travers le calcul pour chaque heure et l'autre cas est pris constant ou les valeurs minimales et maximales du SOC sont égaux à 0 et 1 pour différents types et coût des batteries. Après la simulation de cette analyse, les résultats démontrent que le premier cas donne un meilleur dimensionnement avec un bon coût de prestation par rapport au deuxième cas.

L'utilisation du système de stockage d'énergie (BESS) par batterie joue un rôle très important dans cette étude et contient des avantages tels que : le stockage d'énergie, réduire les fluctuations de la tension et assurer la stabilité du réseau électrique, vendre de l'énergie lorsque le micro-réseau besoin. L'intégration du système de stockage d'énergie par batterie avec le système hybride (PV/éolien) est très bénéfique et tous les avantages cités sont prouvés dans cette étude.

Le type de batterie choisie dans ce travail est de type lithium-ion (Li-ion). Cette nouvelle technologie contient des avantages très intéressants, dont le plus important est la durée de vie de ce type de batterie qui est plus long par rapport aux autres types de batteries. D'après les résultats obtenus on a montré le bon choix de l'utiliser avec le système hybride (PV/éolien) et même pour l'étude d'optimisation.

On conclut que la méthode d'optimisation améliorée par FC-VAC PSO démontre son efficacité et une meilleure solution est obtenue pour le dimensionnement et le coût de bénéfice pour le système hybride (PV/éolien/batterie). Ce système hybride confirme sa performance et il est rentable et offre un coût de prestation durant sa durée de vie.

### **6.3. Perspectives**

Le thème de recherche traité est un sujet d'actualité et très intéressant dans le domaine des énergies renouvelables surtout avec la connexion au réseau électrique. On peut développer et continuer ce sujet de recherche dans les futurs travaux à travers quelques perspectives suggéré dont on cite :

- Etude de l'optimisation d'un système d'énergie hybride (PV/éolien) en ajoutant d'autres sources d'énergie renouvelable telles que (la géothermie, la biomasse, hydraulique, etc...) ou même conventionnelles avec l'intégration d'autres types de systèmes de stockage d'énergie comme (l'hydrogène, électrolyser, supra-condensateur etc...) avec la connexion au réseau électrique ;
- Intégration d'une charge alternative à l'étude techno-économique ;
- Développer d'autres méthodes métaheuristiques nouvelles dont le but de résoudre le problème d'optimisation ;
- Une étude comparative entre les méthodes métaheuristiques étudiées avec celle qui sera développée à propos de l'étude techno-économique.

## Annexe A- Paramètres du système d'énergie hybride

-Les paramètres du système d'énergie hybride connecté au réseau utilisé dans la partie de modélisation sont mentionnés dans le tableau suivant :

<i>Composant</i>	<i>Valeur</i>	<i>Signification</i>
<b>Photovoltaïque</b>	/	<b>Type :</b> <i>Sanyo HIP 225-HDE1</i>
	2.550	La puissance maximale (kW)
	10	La puissance nominale (kW)
	60	Nombre de celle/module
	5	Nombre de module connectés en série/chaine
	2	Nombre de chaines parallèles
	41.7984	Tension du circuit ouvert (V)
	7.13383	Le courant de court-circuit (A)
	33.9	La tension au point de puissance maximale (V)
	6.63419	Le courant au point de puissance maximale (A)
	0.20439	Résistance série ( $\Omega$ )
	1830.7	Résistance parallèle ( $\Omega$ )
	$3.0815e^{-7}$	Courant de saturation de diode (A)
	7.145	Courant de photo-généré (A)
1.6	Facteur de qualité de diode	
<b>Éolienne</b>	/	<b>Type de machine :</b> <i>Synchrone à aimant permanent 3 ~</i>
	0.425	Résistance statorique ( $\Omega$ )
	153	Vitesse nominale (rad/sec)
	12	Courant nominale (A)
	0.433	Le flux(Wb)
	8.5	Inductance statorique (mH)
	40	Couple nominale (Nm)
	6.5	Puissance maximale (kW)
	60	Puissance nominale (kW)
	5	Nombre de paires de pôle
	0.01197	Inertie du générateur ( $kg.m^2$ )
<b>Batterie</b>	/	<b>Type :</b> Lithium-ion
	200	Tension nominale (V)



	900	Capacité nominale(Ah)
	10.8	Puissance nominale (kWh)
<b>Bus continu</b>	650	Tension nominale du bus continu (V)
<b>Filtre</b>	0.1	Résistance entre onduleur et réseau ( $\Omega$ )
	0.01	Inductance entre onduleur et réseau (H)
<b>Réseau</b>	400	Tension du micro-réseau (V)
	50	Fréquence du réseau (Hz)

-La modélisation du système hybride (PV/éolien) est effectuée selon les mesures de l'éclairement solaire sous STC (Standard Test Conditions) avec  $1000\text{W/m}^2$  et  $25\text{C}^\circ$ , et la vitesse de vent égale à  $12\text{m/s}$ .

- Les prix relatif pour chaque système, sont mentionnés dans le tableau suivant :

<b>Composant/Prix</b>	<b>Photovoltaïque</b>	<b>L'éolienne</b>	<b>Batterie</b>
<i>Prix d'achat</i>	2000 \$/kW	3000 \$/kW	1500 \$/kWh
<i>Prix de remplacement</i>	0	0	1500 \$/kWh
<i>Prix de maintenance</i>	20 \$/kW	90 \$/kW	50 \$/kWh
<i>Durée de vie (année)</i>	20	20	15

-Les coûts des différents types des batteries utilisées pour l'étude de sensibilité :

<b>Type de batterie/Coûts</b>	<b>Plomb-acide</b>	<b>Nickel-Cadmium Ni-Cd</b>	<b>Vanadium Redox Flow (VRB)</b>
<i>Coût de capitale</i>	300 \$/kWh	1200 \$/kWh	600 \$/kWh
<i>Coût de remplacement</i>	300 \$/kWh	1200 \$/kWh	600 \$/kWh
<i>Coût de maintenance</i>	10 \$/kWh	40 \$/kWh	20 \$/kWh
<i>Durée de vie (année)</i>	5	20	10

## Références Bibliographiques

- [1] EFSTATHIOS E. (STATHIS) MICHAELIDES, *Alternative Energy Sources*, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] IONEL VECHIU, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de HAVRE, soutenu le 15/12/2005.
- [3] BHANDARI B., LEE K.T., LEE C.S., SONG C.K., MASKEY R.K., "A Novel Off-Grid Hybrid Power System Comprised of Solar Photovoltaic, Wind, and Hydro Energy Sources" *Applied Energy*, Vol. 133, pp. 236-242, 2014.
- [4] OLIVIER GERGAUD, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat, Département d'électrotechnique, Ecole Normale Supérieure de CACHAN, soutenue le 09/12/2002.
- [5] CIHAN GOKCOL AND BAHTIYAR DURSUN, "Determination of the Optimum Renewable Power Generating Systems for an Educational Campus in KIRKLARELI University", *Electronic Journal of Vocational Colleges*, pp.8-17, 2011.
- [6] BENOIT ROBYNS, ARNAUD DAVIGNY, BRUNO FRANÇOIS, ANTOINE HENNETON, JONATHAN SPROOTEN, *Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables*, collection science et technologies de l'énergie électrique dirigée, Lavoisier, CACHAN, 2012.
- [7] HOQUE A., WAHID K.A., "New mathematical model of a photovoltaic generator", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. EE28, No.1, June 2000.
- [8] ANGEL CID PASTOR M., "Conception et réalisation de module photovoltaïque électronique", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de TOULOUSE, 2006.
- [9] SEBASTIEN QUAZOLA, "Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mes poreux pour report sur substrats économique et application photovoltaïque bas cout", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de LYON, 2003.
- [10] ASTIER S., *Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule*, technique de l'ingénieur, article D3935, PARIS, 2008.
- [11] GERMAN SOLAR ENERGY SOCIETY, *Planning & Installing photovoltaic systems*, Earthscan, LONDRES, 2008.
- [12] EQUER B., "Les filières photovoltaïques : progrès récents, recherches actuelles", *Actes de la journée SEE-ISA FRANCE « l'énergie photovoltaïque »*, 29-30 avril 2009.
- [13] MOREAU L., "Modélisation, conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse", Thèse de Doctorat soutenue le 09/12/2005, Université de NANTES, France.
- [14] JEAN-CLAUDE SABLONNIERE, *Nouvelles technologies de l'énergie : les énergies renouvelables*, Lavoisier, PARIS, 2006.
- [15] LAVERDURE N., "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires", Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de CACHAN, FRANCE, 2005.
- [16] SOLTANE BELAKEHAL, "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables", Thèse de Doctorat soutenue le 10/06/2010, Département d'électrotechnique, Université de Constantine, Algérie.
- [17] POITIERS F., "Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de NANTES, 2003.
- [18] CARLSON O., GRAUERS A., SVENSSON J., LARSSON A., "A Comparison of Electrical Systems for Variable Speed Operation of Wind Turbines", *European Wind Energy Conference*, pp. 500-505, 1994.
- [19] KAABECHE ABDELHAMID, "Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome", Thèse de Doctorat, soutenue le 16/02/2012,

- Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique-El Harrach-d 'Alger, Algérie.
- [20] Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables, Edition 2016.
- [21] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-solaire-dans-le-mix-energetique-mondial>.
- [22] Global status report, renewables 2017.
- [23] <http://fee.asso.fr/leolien-poursuit-son-developpement-mondial/>.
- [24] CHRISTINE LINS, "Renewables 2015 global status report", *Rapport d'évolution mondiale de l'énergie renouvelable*, Paris, France, 2015.
- [25] KHIER NACIRA, RABIA MIMOUNA, BOUDER ABDELMADJID, "La politique énergétique de l'après hydrocarbures en ALGERIE", *1<sup>er</sup> Colloque International sur Hydrocarbures, Énergies et Environnement –HCEE-*, OUARGLA 23/ 24 novembre 2014.
- [26] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, CDER, Mars 2011 et Mai 2015.
- [27] Guide des énergies renouvelables, Edition 2007.
- [28] BINAYAK BHANDARI, KYUNG-TAE LEE, GIL-YONG LEE, YOUNG-MAN CHO, AND SUNG-HOON AHN, "Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A review", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol.2, No.1, pp. 99-112,2015.
- [29] LUDMIL STOYANOV, "Structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", *revue de génie industriel*, vol.5, pp.1-19,2010.
- [30] LUDMIL STOYANOV, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Thèse de Doctorat en énergétique, Université de CORSE PASQUALE PAOLI, soutenue le 28/10/2011.
- [31] ASHARI M., NAYAR C.V., "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system", *Renewable energy - Elsevier science*, Vol.66, No.1, pp.1-9, 1999.
- [32] FRANÇOIS BADIN, STEPHANE BISCAGLIA, JEAN BONAL, REGINE CLAVREUL, JEAN FRANÇOIS FAUVARQUE, JULIETTE KAUV, WALID LAJNEF, PHILIPPE LEFEVRE, HERVE LESUEUR, BERNARD MULTON, SANDRINE PINCEMIN, ALEXANDRE ROJEY, JACQUES RUER, PHILIPPE STEVENS, *Le stockage de l'énergie*, Dunod, Paris, 2013.
- [33] ACHAIBOU NADIA, "Optimisation du stockage des énergies renouvelables", Thèse de Doctorat en électronique, soutenu le 15/11/2011 Ecole Nationale Polytechnique EL-Harrach Alger, Algérie,
- [34] YAËL THIAUX, "Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides –Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion", Thèse de Doctorat, soutenue le 08/07/2010. Ecole Normale Supérieure de Cachan, France
- [35] DE GUIBERT A., "*Colloque IFP Panorama, rapport technique*", SAFT, 2010.
- [36] RAEL S., "Composants nouveaux pour le stockage et la génération d'énergie électrique : Modélisation électrique, caractérisation et mise en œuvre", Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de LORRAINE, 2005.
- [37] MATTERA F., COLIN H., MERTEN J., PERRIN M., MOURZAGH D., SARRE G. AND MARCEL J.C., "Lithium Batteries in stand-alone photovoltaic applications", *European Photovoltaic Solar Energy Conference '21*, DRESDEN-GERMANY, 4-8 September 2006.
- [38] PERRIN M., SAINT DRENAN Y.M., MATTERA F. AND MALBRANCHE P., "Lead-acid batteries in stationary applications: competitors and new markets for large penetration of renewable energies", *Journal of Power Sources*, Vol.144, pp.402 – 410, 2005.
- [39] BRAUN M., BUDENBENDER K., MAGNOR D. AND JOSSEN A., "Photovoltaic Self-Consumption in Germany using Lithium-Ion Storage to Increase Self-Consumed Photovoltaic Energy", *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition '24*, HMBURG-GERMANY,21-25 September 2009.
- [40] VINCENT BENAMARA, "Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage", Mémoire de maîtrise en génie électrique, Université du QUEBEC, MONTREAL, soutenu le

14/09/2012.

- [41] NAKOUL ZAKIA, "Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV [Application aux sites TLEMEN Et BOUZAREAH] ", Mémoire de magistère, soutenu le 04/07/2010 au Département de physique, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- [42] LOBRANO V., ORIOLI A., CIULLA G., DI GANGI A. "An improved five-parameter model for photovoltaic modules". *Solaris Energy Materials & Solar Cells*, Vol.94, pp.1358–1370, 2010.
- [43] DJARALLAH MOHAMED, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique", Thèse de Doctorat, soutenue le 16/01/2008 au Département d'électrotechnique, Université El hadj Lakhdar de Batna, Algérie.
- [44] DE BLAS M.A., TORRES J. L., PRIETO E. ET GARCIA A., "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices", *Renewable Energy*, Vol. 25, No.3, pp. 371-380, Mar. 2002.
- [45] LORENZO E., *Energy Collected and Delivered by PV Modules*, in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, pp. 905-970, 2003.
- [46] CASTANER L., SILVESTRE S., CASTAANER L., *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*, JOHN WILEY & SONS, 2002.
- [47] SAIB SAMIA, GHERBI AHMED, "Simulation and control of hybrid renewable energy system connected to the grid", *International Youth Conference On energy IYCE '15*, PISA, ITALY, 2015.
- [48] TRISHAN ESRAM and PATRICK CHAPMAN L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE transaction on energy conversion*, 2006.
- [49] FERNANDO BIANCHI D., HERNAN DE BATTISTA, RICARDO MANTZ J., *Wind Turbine Control Systems*, Edition Springer, 2007.
- [50] MAHDI A.J., TANG W.H., JIANG L., WU Q.H., "A Comparative Study on Variable-Speed Operations of a Wind Generation System Using Vector Control", *Proceeding in ICREPQ'10*, Granada, Spain, 2010.
- [51] JUSTUS C.G., PLAZY J.L., "Vent et performances des éoliennes ", Franklin Institute Press, SCM PARIS, FRANCE, 1980.
- [52] HAMECHA SAMIRA, "Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents", Mémoire de magistère, soutenu le 25/06/2013 au Département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [53] EL AIMANI S., "Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de LILLE (USTL) ,2004.
- [54] HANSEN A.D., JAUCH C., SØRENSEN P., IOV F., BLAABJERG F., "Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT ", *Projet de recherche, laboratoire national de Riso, ROSKILDE*. December 2003.
- [55] MIRECKII A., "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, soutenue le 05/04/2005 à l'Institut National Polytechnique de Toulouse. France.
- [56] HAQUE M. E., MICHAEL NEGNEVITSKY ET KASHEM MUTTAQI, "A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, PP.1-8, 2008.
- [57] HASSAINE SAID, "Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents", Thèse de Doctorat, Université d'Oran, Alegria, 2008.
- [58] COURTESUISSE V., "Supervision d'une centrale multi source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique", Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Nationale D'arts et Métiers, 2008.
- [59] DI LU, "Conception et contrôle d'un générateur photovoltaïque PV actif à stockage intégré. Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain", Thèse de Doctorat en génie électrique, soutenue le 16/12/2010, Ecole Centrale de Lille, France.

- [60] HUSSEIN IBRAHIM, ADRIAN ILINCA, MAZEN GHANDOUR, MARIYA DIMITROVA, DANIEL BOULAY, CEDRIC ARBEZ, MATTEWU ADEGNON, "Investigation des diverses options de stockage d'énergie face à l'intégration des parcs éoliens dans les réseaux", *1ère conférence Franco-Syrienne sur les énergies renouvelables*, PP : 1-15, DAMAS, 24-28 Octobre 2010.
- [61] OLIVIER TREMBLAY, LOUIS. A. DESSAINT, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications", *Journal de World Electric Vehicle*, Vol. 3, STAVANGER, NORWAY, May 13 - 16, 2009.
- [62] MOHAMED ANSOUMANE CAMARA, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs", Thèse de Doctorat, soutenue le 04/07/2011 à l'Université Paris-Est Créteil, France.
- [63] HAMROUNI N., CHÉRIF A., "Modeling and control of a grid connected photovoltaic system", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, No.3, Tunis, 2007.
- [64] FEI DING, PENG LI, BIBIN HUANG, FEI GAO, CHENGDI DING, CHENGSHAN WANGN, "Modeling and Simulation of Grid-connected hybrid Photovoltaic/Battery distributed generation system", *International conference on Electricity Distribution*, pp.1-10, China, 2010.
- [65] KACI YAHIA, "Etude d'une nouvelle approche MLI (PWM) en temps réel basée sur le principe des réseaux de neurones destinée aux véhicules électriques", Mémoire de magistère soutenu le 15/01/2015, Département d'Electronique, Université Mouloud Mammeri –Tizi-Ouzou, Algérie.
- [66] WILDI T., SYBILLE: *Electrotechnique*, 4ème édition, Belgique-Bruxelles, 2009.
- [67] JIM ÖGREN, "PLL design for inverter grid connection", Department of Engineering Sciences UPPSALA University, pp.43, 2011.
- [68] YANN PANKOW, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Soutenue le 10/12/2004 à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, France.
- [69] FLORIN MOGOS E., "Production décentralisé dans les réseaux de distribution", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, France, juillet 2005.
- [70] RODRIGUEZ P., LUNA A., CIBOTARU M., TEODORESCU R., AND BLAABJERG F., "Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions", *32<sup>nd</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, "IECON", Paris, 2006.
- [71] TEODORESCU R., BLAABJERG F., IOV F., ANDERSEN B., BIRK J., MIRANDA J., "A comparison of control strategies for grid converters in wind power systems", *International Exhibition & Conference for Power Conversion and Industrial Motion*, GERMANY, 2006.
- [72] RABEH ABBASSI, MANEL HAMMAMI, SOUAD CHEBBI, "Improvement of the integration of a grid connected Wind/photovoltaic hybrid system", *International Conference on Electrical Engineering and software Applications "ICEESA"*, Hammamet-Tunisia, 21-23 March 2013, pp.1-5.
- [73] BANOS R., MANZANO-AGUGLIARO F., MONTOYA F. G., GIL C., ALCAYDE A. AND GOMEZ J., "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 4, pp. 1753-1766, 2011.
- [74] AMIRA GHERBOUDJ, "Méthode de résolution des problèmes difficiles académiques", Thèse de Doctorat, Département d'Informatique Fondamentale et ses Applications, Université de CONSTANTINE 2, 2013.
- [75] BERRAZOUANE SOFIANE, "Modeling, simulation and supervision of multi-source hybrid system for electricity production in remote areas", Thèse de Doctorat, Département de Maintenance, Université M'hamed Bougara, Boumerdes , Algérie ; 2014.
- [76] PRABODH BAJPAI AND VAISHALEE DASH, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, pp.2926 -2939, 2012.
- [77] KASHE KAVIANI A., RIAHY G.H. AND KOUHSARI S.H.M., "Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages", *Journal of Renewable Energy*, Vol.34, pp.2380 - 2390, 2009.
- [78] ERIKSSON EMMA, GRAY EVAN, "Optimization and Integration of Hybrid Renewable Energy Storage

- Systems", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol.73, pp.1-7, 2017.
- [79] AL BUSAIDI A.S., KAZEM H.A., AL-BADI A.H., KHAN M.F., "A review of optimum sizing of hybrid PV–Wind renewable energy systems in OMAN", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 185-193, 2016.
- [80] BHANDARI R. and STADLER I., "Electrification using Solar Photovoltaic Systems in NEPAL" *Applied Energy*, Vol. 88, No. 2, pp. 458-465, 2011.
- [81] BHUIYAN M.M.H., ASGAR M.A., "Sizing of a standalone photovoltaic power system at DHAKA", *Renewable Energy*, Vol.28, No.6, pp.929–938, 2003.
- [82] BELFKIRA R., ZHANG L., BARAKAT G., "Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit", *Solar Energy*, Vol.85, No.1, pp.100–110, 2011.
- [83] SUNANDA SINHA, CHANDEL S.S., "Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind-based hybrid energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.50, pp.755–769,2015.
- [84] SAMIR DAWOUD M., XIANGNING LIN, MERFAT OKBA I., "Hybrid renewable micro grid optimization techniques: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.82, pp.2039–2052, 2018.
- [85] BAGUL A.D., SALAMEH Z.M., BOROWY B., "Sizing of a stand-alone hybrid wind photovoltaic system using a three-event probability density approximation", *Solar Energy*, Vol.56, No.4, pp.323–335, 1996.
- [86] KARAKI S.H., CHEDID R.B., RAMADAN R., "Probabilistic performance assessment of autonomous solar–wind energy conversion systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.14, No.3, pp.766–772, 1999.
- [87] POSADILLO R. AND LÓPEZ LUQUE R., "Approaches for Developing a Sizing Method for Stand-Alone PV Systems with Variable Demand ", *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 5, pp. 1037-1048, 2008.
- [88] DE A.R. and MUSGROVE L., "The Optimization of Hybrid Energy Conversion Systems using the Dynamic Programming Model-Rhapsody", *International Journal of Energy Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 447-457, 1988.
- [89] MARKVART T., FRAGAKI A. and ROSS J., "PV System Sizing using Observed Time Series of Solar Radiation «, *Solar Energy*, Vol. 80, No. 1, pp. 46-50, 2006.
- [90] AI B., YANG H., SHEN H. AND LIAO X., "Computer-Aided Design of PV/Wind Hybrid System", *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 10, pp. 1491-1512, 2003.
- [91] BOROWY B.S., SALAMEH Z.M., "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.11, No.2, pp.367–373, 1996.
- [92] MARKVART T., "Sizing of hybrid PV–wind energy systems", *Solar Energy*, Vol.59, No.4, pp.277–81, 1996.
- [93] UPADHYAY S., SHARMA M.P., "A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Vol.38, pp.47–63, 2014.
- [94] LUNA-RUBIO R., TREJO-PEREA M., VARGAS-VA´ZQUEZ D., RI´OS-MOREN G.J, " Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies ", *Solar Energy*, Vol.86, pp.1077–1088, 2012.
- [95] CONNOLLY D., LUND H., MATHIESEN B.V., Leahy M., "A review of computer tools for analyzing the integration of renewable energy into various energy systems", *Applied Energy*, Vol.87, pp.1059.1082, 2010.
- [96] DALTON G.J., LOCKINGTON D.A., BALDOC T.E., "Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel", *Renewable Energy*, Vol. 33, No.7, pp.1475–1490, 2008.
- [97] KHATOD D.K., PANT V., SHARMA J., "Analytical approach for well-being assessment of small autonomous power systems with solar and wind energy sources", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.25, pp.535–545, 2010.

- [98] PATIL A.B.K., SAINI R.P., SHARMA M.P., "Sizing of integrated renewable energy system based on the load profiles and reliability index for the STATE OF UTTARAKHAND in INDIA", *Renewable Energy*, Vol.36, No.1, pp.2809–2821, 2011.
- [99] MAKAROV Y.V., DU P., MEYER M.C.W.K., JIN C., ILLIAN H.F., "Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, Vol.3, No.1, pp.34–40, 2012.
- [100] LI J., WEI W., and XIANG J., "A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Micro grids", *Energies*, Vol. 5, No. 12, pp. 5307-5323, 2012.
- [101] YANG H.X., LU L., ZHOU W., "A novel optimization sizing model for hybrid solar–wind power generation system", *Solar Energy*, Vol.81, No.1, pp.76–84, 2007.
- [102] KALDELLIS J.K, KONDILI E., FILIOS A., "Sizing a hybrid wind-diesel stand-alone system on the basis of minimum long-term electricity production cost", *Applied Energy*, Vol.83, No.1, pp.1384–403, 2006.
- [103] KALDELLIS J.K., ZAFIRAKIS D., KAVADIAS K., "Minimum cost solution of wind- photovoltaic based stand-alone power systems for remote consumers", *Energy Policy*, Vol.42, No.1, pp.105–117, 2012.
- [104] NIKHIL P.G., SUBHAKAR D., "Sizing and parametric analysis of a stand-alone photovoltaic power plant", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol.3, No.2, pp.776–784, 2013.
- [105] XU L., RUAN X., MAO C., ZHANG B., LUO Y., "An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system", *IEEE Transaction on Sustainability Energy*, Vol.4, No.3, pp.774–784, 2013.
- [106] OGUNJUYIGBE A.S.O, AYODELE T.R, AKINOLA O.A, "Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building», *Applied Energy*, Vol.171, pp.153–171, 2016.
- [107] RAJANNA S., SAINI R.P., "Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote INDIAN area", *Energy*, Vol.111, pp.803–817, 2016.
- [108] Chen H.C., "Optimum capacity determination of stand-alone hybrid generation system considering cost and reliability", *Applied Energy*, Vol.103, pp.155–164, 2013.
- [109] AKBAR MALEKI, HAMED HAFEZANIA, MARC ROSEN A., FATHOLLAH POURFAYAZ, "Optimization of a grid-connected hybrid solar-wind-hydrogen CHP system for residential applications by efficient metaheuristic approaches", *Applied Thermal Engineering*, Vol.123, pp.1263-1277, 2017.
- [110] ISMAIL M.S., MOGHAVVEMI M., MAHLIA T.M.I., "Genetic algorithm-based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 85, pp.120–130, 2014.
- [111] BERRAZOUANE S., MOHAMMEDI K., "Parameter optimization via cuckoo optimization algorithm of fuzzy", *Energy Conversion and Management*, Vol.78, pp.652–660, 2014.
- [112] MALLA S.G. and BHENDE C.N., "Enhanced operation of stand-alone photovoltaic-diesel generator-battery system", *Electric Power Systems Research*, Vol.107, pp.250–257, 2014.
- [113] GEORGE KYRIAKARAKOS, ANASTASIOS DOUNIS I., KONSTANTINOS ARVANITI G., and GEORGE PAPADAKIS, "A fuzzy logic energy management system for polygeneration micro grids", *Renewable Energy*, Vol.41, pp.315–327, 2013.
- [114] PABLO GARCIA, JUAN TORREGLOSA P., LUIS FERNANDEZ M., AND FRANCISCO JURADO, "Optimal energy management system for stand-alone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.38, pp.14146–14158, 2013.
- [115] EL-TAMALY H.H., MOHAMMED A.A.E., "Impact of interconnection photovoltaic/ wind system with utility on their reliability using a fuzzy scheme", *Renewable Energy*, Vol.31, pp.2475–2491, 2006.
- [116] CHEKIREF F., MAHRANE A., CHIKH M., SMARA Z., "Optimization of energy management of a photovoltaic system by the fuzzy logic technique", *Energy Procedia*, Vol.6, pp.513–521, 2011.
- [117] EMAD MAHER NATSHEH, "Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial

- Intelligence", Thèse de Doctorat, Manchester Metropolitan University, July 2013.
- [118] KALOGIROU S.A., "Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 29, No.6, pp.515–566, 2003.
- [119] KALLOL ROY, KAMAL KRISHNA MANDAL, ATIS CHANDRA MANDAL, SANKAR NARAYAN PATRA, "Analysis of energy management in micro grid – A hybrid BFOA and RNA approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.82, pp.4296-4308, 2018.
- [120] PUNITHA K., DEVARAJ D., SAKTHIVEL S., "Artificial neural network based modified in-Cremental conductance algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic system under partial shading conditions", *Energy*, Vol.62, pp.330–340, 2013.
- [121] YUMURTACI R., "Role of energy management in hybrid renewable energy systems: case study-based analysis considering varying seasonal conditions". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science*, Vol.21, pp.1077–1091, 2013.
- [122] BERCLIN JEYAPRABHA S., IMMANUEL SELVAKUMAR A., "Optimal sizing of photovoltaic / battery/diesel-based hybrid system and optimal tilting of solar array using the artificial intelligence for remote houses in INDIA", *Energy and Buildings*, Vol.96, pp. 40–52,2015.
- [123] HINA FATHIMA A., PALANISAMY K., "Optimization in micro grids with hybrid energy systems – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.45, pp.431–446, 2015.
- [124] OSMAN I.H., LAPORTE G., "*Metaheuristics: A bibliography*", Annuals of Operations Research-Springer, Vol. 63, N° 5, pp. 513-623, 1996.
- [125] BAÑOS R., MANZANO-AGUGLIARO F., MONTOYA F.G., GIL C., ALCAYDE A., GÓMEZ J., "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, pp.1753–1766,2011.
- [126] XAVIER ROBOAM, *Conception systémique pour la conversion d'énergie électrique 2 : approche intégrée par optimisation*, Ed. Lavoisier, PARIS, 2012.
- [127] JOHANN DREO, ALAIN PETROWSKI, PATRICK SIARRY, ÉRIC TAILLARD, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Eyrolles, PARIS, 2011.
- [128] YAHIAOUI A., BENMANSOUR K., TADJINE M., "Control, analysis and optimization of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated rural city in ALGERIA", *Solar Energy*, Vol. 137, pp.1–10, 2016.
- [129] PALIWAL P., PATIDAR N. P., NEMA R. K., "Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using Particle Swarm Optimization", *Renewable Energy*, Vol.63, pp.194–204, 2014.
- [130] ASKARZADEH A., DOS SANTOS COELHO L., "A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of IRAN", *Solar Energy*, Vol.112, pp.383–396, 2015.
- [131] HASSAN A., KANDIL M., SAADAWI M., SAEED M., "Modified particle swarm optimization technique for optimal design of small renewable energy system supplying a specific load at MANSOURA University". *IET Renewable Power Generation*, Vol.9, pp.474–483, 2015.
- [132] MALEKI A., AMERI M., KEYNIA F., "Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system", *Renewable Energy*, Vol.80, pp.552–563, 2015.
- [133] SAMIA SAIB, AHMED GHERBI, ABDELHAMID KAABECHE and RAMAZAN BAYINDIR, "Techno-Economic Optimization of a Grid-Connected Hybrid Energy System Considering Voltage Fluctuation", *Journal of electrical engineering and Technology*, Vol.3, No.2, pp. 659-668, 2018.
- [134] FATHY A., "A reliable methodology based on mine blast optimization algorithm for optimal sizing of hybrid PV-wind-FC system for remote area in EGYPT", *Renewable Energy*, Vol.95, pp.367–380, 2016.
- [135] SUHANE P., RANGNEKAR S., KHARE A., MITTAL A., "Sizing and performance analysis of standalone wind-photovoltaic based hybrid energy system using ant colony optimization", *IET Renewable Power Generation*, Vol.10, pp.964–972, 2016.
- [136] ZHAO J., YUAN X., "Multi-objective optimization of stand-alone hybrid PV-wind-diesel- battery system using improved fruit fly optimization algorithm", *Soft Computing*, Vol.20, pp.2841–2853,2015.



- [137] GUPTA R.A., KUMAR R., BANSAL A.K., "BBO-based small autonomous hybrid power system optimization incorporating wind speed and solar radiation forecasting", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Vol.41, pp.1366–1375,2015.
- [138] SINGH S., SINGH M., KAUSHIK S. C., "Feasibility study of an islanded micro grid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system", *Energy Conversion & Management*, Vol.128, pp.178–190, 2016.
- [139] AKBAR MALEKI, FATHOLLAH POURFAYAZ, "Sizing of stand-alone photovoltaic/wind/diesel system with battery and fuel cell storage devices by harmony search algorithm", *Journal of Energy Storage*, Vol.2, pp.30-42, 2015.
- [140] NADJEMI O., NACER T., HAMIDAT A., SALHI H., "Optimal hybrid PV/wind energy system sizing: Application of cuckoo search algorithm for ALGERIAN dairy farms". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.70, pp.1352-1365, 2017.
- [141] EKREN O., EKREN B.Y., "Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing", *Applied Energy*, Vol.87, pp.592–608, 2010.
- [142] ABDELHAMID KAABECHE, SAID DIAF, RACHID IBTIOUEN, "Firefly-inspired algorithm for optimal sizing of renewable hybrid system considering reliability criteria", *Solar Energy*, Vol.155, pp.727–738, 2017.
- [143] KATSIGIANNIS Y.A., GEORGILAKIS P.S., KARAPAIKAKISE.S., "Hybrid simulated annealing-tabu search method for optimal sizing of autonomous power systems with renewables", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, Vol.3, No.3, pp.330–338, 2012.
- [144] ASKARZADEH A., "A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV/wind hybrid system", *Solar Energy*, Vol.97, pp.93–101, 2013.
- [145] TUTKUN N., "Minimization of operational cost for an off-grid renewable hybrid system to generate electricity in residential buildings through the SVM and the BCGA methods", *Energy and Building*, Vol.76, pp.:470–475, 2014.
- [146] KHATIB T., MOHAMED A., SOPIAN K., "Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: case study of KUALA TERENGGANU, MALAYSIA", *Energy and Building*, Vol.47, pp.321–331.
- [147] DEHGHAN S., KIANI B., KAZEMI A., PARIZAD A., "Optimal sizing of a hybrid wind/PV plant considering reliability indices", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.56, No.32, pp.527–535, 2009.
- [148] ZHOU T., SUN W., "Optimization of battery–super capacitor hybrid energy storage station in wind/solar generation system", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, Vol.5, No.2, pp.408–415, 2014.
- [149] MUKHTARUDDIN R.N.S.R., RAHMAN H.A., HASSAN M.Y., JAMIAN J.J., "Optimal hybrid renewable energy design in autonomous system using Iterative-Pareto-Fuzzy technique", *Electric Power Energy System*, Vol.64, 242–249, 2015.
- [150] ALSAYED M., CACCIATO M., SCARCELLA G., SCALBA G., "Design of hybrid power generation systems based on multicriteria decision analysis", *Solar Energy*, Vol.105, pp.548–560, 2014.
- [151] COLLEN ZALENGERA, "A Study into the Techno-economic Feasibility of Photovoltaic and Wind Generated Electricity for Enhancement of Sustainable Livelihoods on Likoma Island in MALAWI", Thèse de Doctorat, soutenue en Janvier 2015 Université de Loughborough.
- [152] VIVAS F.J., DE LAS HERAS A., SEGURA F., ANDÚJAR J.M., "A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp.126–155, 2018.
- [153] LINDEN T.B., DAVID REDDY, *Handbook of batteries*, McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> Ed, UNITED STATES, 2002.
- [154] CHAUHAN A., SAINI R.P., "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: configurations, storage options, sizing methodologies and control", *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol.38, pp.99–120, 2014.
- [155] KARAMI N., MOUBAYED N., OUTBIB R., "Energy management for a PEMFC-PV hybrid system", *Energy*

- Conversion & Management*, Vol.82, pp.154–168, 2014.
- [156] IPSAKIS D., VOUTETAKIS S., SEFERLIS P., STERGIOPOULOS F., PAPADOPOULOU S., ELMASIDES C., "The effect of the hysteresis band on power management strategies in a stand-alone power system", *Energy*, Vol.33, No.10, pp.1537–1550, 2008.
- [157] COZZOLINO R., TRIBIOLI L., BELLA G., "Power management of a hybrid renewable system for artificial islands: a case study", *Energy*, Vol.106, pp.774–789, 2016.
- [158] SKOPLAKI E., PALYVOS J.A., "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency /power correlations", *Solar Energy*, pp.614-624, 2008.
- [159] FATEMEH JAHANBANI, GHOLAM RIAHY H., Optimum design of a hybrid renewable energy system, *Renewable Energy- Trends and applications*, Intech, CROATIA, 2011.
- [160] YANG H., LU L., ZHOU W., "A Novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system", *Solar Energy*, Vol.81, pp.76-84, 2007.
- [161] REEVES W.T., "Particle systems-a technique for modeling a class of fuzzy objects", *ACM Transaction Graphics Journal*, Vol. 2, N°2, pp.91-108, 1983.
- [162] REYNOLDS C.W., "Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model", *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, "SIGGRAPH", ANAHEIM, Vol. 21, No. 4, pp.25-34, July 27-31, 1987.
- [163] HEPPNER F., GRENANDER U., "A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks", In: S Krasner (eds) *The ubiquity of chaos*, AAAS Publications, WASHINGTON, DC.
- [164] AMARESH SAHU, SUSHANTA KUMAR PANIGRAHI, SABYASACHI PATNAIK, "Fast Convergence Particle Swarm Optimization for Functions Optimization", *Procedia Technology*, Vol.4, pp.319-324, 2012.
- [165] KRISHNA T.C., MANJAREE P., LAXMI S., "Particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients for non-convex economic power dispatch", *Electric Power Energy System*, Vol.31, pp. 249-257,2009.
- [166] VINAY KUMAR JADOUN, NIAZI K.R., ANIL SWARNKAR, NIKHIL GUPTA, "Variable Acceleration Coefficient-based Particle Swarm Optimization for Non-Convex Economic Load Dispatch Problem", *IEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, INDIA, pp.126-130,01-03 December, 2011.
- [167] MINA MIRBAGHERI S., MOHSEN MIRHASSANI S. and HAZLIE MOKHLIS, "Techno-economic optimization for a hybrid PV-Wind-battery standalone system using imperialistic competitive algorithm", *International Journal of Chemical and Environment Engineering*, Vol.5, No.2, 2014.
- [168] GANGWAR S., BHANJA D., BISWAS A., "Cost reliability and sensitivity of a standalone hybrid renewable energy system –A case study on a lecture building with low load factor", *Journal of Renewable and sustainable Energy*, Vol.7, 2015.
- [169] SHUAIXUN C., GOOI H. B., WANG M., "Sizing of energy storage for micro grids", *IEEE Transaction on Smart Grid*, Vol.3, No.1, 2012.
- [170] XIN QIU, TU NGUYEN A., JOE GUGGENBERGER D., CROW M.L., and ELMORE A.C., "A field validated model of a vanadium redox flow battery for micro grids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.5, N°4, 1592-1601, 2014.