

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie électrique

Spécialité : Réseaux électrique

Thème

**Gestion intelligente de l'énergie dans les systèmes hybrides
(PV–Batterie–Pompe) utilisant des algorithmes évolutifs**

Présenté par :

❖ **BAHA Smail**
❖ **BAHA Zaki**

Encadré par :

Dr. MIDA Driss

Année universitaire : 2025/2026

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie électrique

Spécialité : Réseaux électrique

Thème

**Gestion intelligente de l'énergie dans les systèmes hybrides
(PV–Batterie–Pompe) utilisant des algorithmes évolutifs**

Présenté par :

❖ **BAHA Smail**
❖ **BAHA Zaki**

Encadré par :

Dr. MIDA Driss

Année universitaire : 2025/2026



شكر

إنه لمن دواعي سرورنا الحقيقي أن نخصص هذه السطور للتعبير عن خالص امتناننا وعميق عرفاننا لكل من ساهم، من قريب أو من بعيد، في إنجاز هذا العمل وإنجازه. وقبل كل شيء، نحمد **الله** العليّ القدير ونشكره على إعنته لنا في إنجاز هذا العمل المتواضع.

كما نتوجه بخالص الشكر والتقدير أولاً إلى: **الدكتور ميّة إدريس** الذي تفضل بالإشراف على هذا العمل وتوجيهه منذ لحظاته الأولى؛ ونشكره جزيل الشكر على جديته وجهوده المبذولة في مساعدتنا، ونصحتنا، وإرشادنا.

وبالمثل، أتوجه بالشكر إلى جميع أستاذة قسمنا الذين ساهموا بشكل كبير في تكويننا العلمي.

وأخيراً، أود أيضاً أن أشكر كل الأشخاص الذين شاركوا من قريب أو من بعيد في إخراج هذا العمل إلى النور.

إهداء

إلى الذين أضاءوا عتمة طريقي وشاركوني لحظات الصعود والهبوط؛ أهدي ثمرة
هذا الجهد الأكاديمي إلى والدي الغالي، سند الحياة ورمز الكفاح الذي غرس في
حب الطموح والنجاح، وإلى أُمي الحبيبة، نبع الحنان والصبر الدائم التي
كانت ولا زالت دعواتها الصادقة حبل النجاة لي في كل ضيق. وإلى إخوتي
وأخواتي، شركاء العمر وسندي الذي لا يميل ومصدر قوتي في كل خطوة. وإلى
أصدقائي الأوفياء، رفقاء القلب والمسير، الذين كانوا الكلمة الطيبة واليد
الداعمة لي طوال هذه الرحلة؛ إليكم جميعاً أهدي نجاحي في شهادة الماجستير
مع كل الحب والوفاء.

إسماعيل

إهداء

إلى من كانوا لي المبدأ والسند طوال مسيرتي؛ أهدي ثمرة جهدي هذا إلى الروح
الطاهرة التي غادرتنا جسداً وبقيت معنا أثراً ودعاءً، إلى أبي الغالي -رحمه
الله- الذي تمنيت لو كان بيننا اليوم ليتقاسم معي فرحة هذا الإنجاز، وإلى
أمي الحبيبة، نبع الصبر والتضحية التي أكملت المسيرة بحب وكانت
وعودتها دافعي الأول لكل نجاح. وإلى إخوتي وأخواتي، سندي المتين في هذه
الحياة ومصدر قوتي، من تقاسمت معهم تفاصيل التعب وفرحة الإنجاز
خطوة بخطوة. كما يمتد إهدائي إلى أصدقائي الأوفياء، رفقاء الدرب
والقلب، الذين كانوا لي نعم العون والتشجيع، وجعلوا بصدق مواقفهم
وطيب معشرهم للرحلة معنى وأثراً جميلاً لا ينسى؛ إليكم جميعاً أهدي هذا
العمل مع كل حب وامتنان

ذاكي

Résumé

Ce travail vise à étudier et à optimiser les performances d'un système énergétique hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'une batterie de stockage et d'une pompe à eau, en appliquant des algorithmes évolutifs intelligents pour une gestion optimale de l'énergie. L'étude a débuté par la modélisation de tous les composants du système (PV, batterie, pompe), suivie de la proposition d'une stratégie d'optimisation basée sur l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) afin de répartir l'énergie de manière idéale entre le stockage et la consommation, évitant ainsi les coupures de courant répétées et garantissant la continuité de l'approvisionnement en eau. Les résultats de la simulation ont mis en évidence:

- **La stabilisation** de la charge de la batterie.
- **La réduction** des pertes énergétiques.
- **L'amélioration** du débit d'eau.

Mots-clés : système énergétique hybride - Photovoltaïque – Batterie – Pompe - algorithmes évolutifs intelligents - Gestion optimale de l'énergie - Algorithmes évolutifs - l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO).

الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة وتحسين أداء نظام طاقي هجين يتكون من ألواح شمسية كهروضوئية، بطارية تخزين، ومضخة مائية، وذلك عبر تطبيق خوارزميات تطويرية ذكية لتحقيق إدارة مثلى للطاقة؛ حيث استُهلكت الدراسة بنمذجة جميع مكونات النظام (PV)، البطارية، والمضخة، ليتم بناءً عليها اقتراح استراتيجية تحسين تعتمد على خوارزمية حشد الجسيمات (PSO) لتوزيع الطاقة بشكل متوازن بين الاستهلاك والتخزين، وهو ما يضمن مجابهة الانقطاعات المتكررة للتيار الكهربائي وتأمين استمرارية التزويد بالمياه. وقد أسفرت نتائج المحاكاة عن:

- **استقرار** في شحن البطارية.
- **تقليل** الفواقد الطاقوية.
- **تحسين** تدفق المياه.

مما يثبت دور الخوارزميات التطويرية في رفع كفاءة النظام بنسبة معتبرة، ويجعل هذا التجانس الطاقي حلاً مثالياً ومستداماً للتطبيق في المناطق الصحراوية والمعزولة.

كلمات مفتاحية: نظام طاقة هجين - الخلايا الكهروضوئية - بطارية - مضخة - خوارزميات تطويرية ذكية - الإدارة المثلى للطاقة - خوارزميات تطويرية - خوارزمية أمثلية سرب الجسيمات (PSO).

Abstract

Ce qui prouve l'efficacité des algorithmes évolutifs pour rehausser significativement le rendement global du système, faisant de cette solution un choix idéal et durable pour les régions désertiques et isolées.

This work aims to study and optimize the performance of a hybrid energy system consisting of photovoltaic panels, a storage battery, and a water pump, by applying intelligent evolutionary algorithms for optimal energy management. The study began with the modeling of all system components (PV, battery, and pump), followed by the proposal of an optimization strategy based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to achieve an ideal energy distribution between storage and consumption, thereby preventing frequent power outages and ensuring a continuous water supply. The simulation results demonstrated:

- **Stabilization** of the battery charge.
- **Reduction** of energy losses.
- **Improvement** of water flow.

This proves the vital role of evolutionary algorithms in significantly raising the system's efficiency, making this hybrid solution ideal and sustainable for application in desert and isolated regions.

Keywords: Hybrid energy system - Photovoltaic - battery - pump - intelligent evolutionary algorithms - optimal energy management - evolutionary algorithms - Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

Figure I.1. Schéma général du système d'énergie hybride	2
Figure I.2. Classifications des systèmes hybrides	3
Figure I.3. Schéma illustrant Système hybride éolien/stockage	4
Figure I.4. Architecture multi-sources couplée au bus alternatif	5
Figure I.5. Architecture multi-sources couplée au mixte à bus à CC/AC	6
Figure I.6. Architecture multi-sources couplée au bus continu	7
Figure I.7. Principe de conversion DC-DC par un hacheur	8
Figure I.8. Systèmes hybrides PV/diesel.....	9
Figure I.9. Systèmes hybrides PV/diesel avec interrupteur	10
Figure I.10. Systèmes hybrides PV/diesel parallèle.....	10
Figure I.11. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	11

Chapitre II : Modélisation des composants

Figure II.1. Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	13
Figure II.2. Raccordement en série.	15
Figure II.3. Raccordement en parallèle.....	16
Figure II.4. Cellule électrochimique de base	16
Figure II.5. Modèle équivalent électrique simple d'une batterie	17
Figure II.6. Tension, courant et l'état de charge des supercondensateurs en cas de décharge	18
Figure II.7. Convertisseur associé aux batteries	19
Figure II.8. Le schéma de principe de la première séquence de conduction	20
Figure II.9. Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.....	20
Figure II.10. Schéma de L'onduleur de Tension	21
Figure II.11. Schéma Équivalent d'une MCC à Excitation Séparée	22
Figure II.12. Schéma illustrant les composants électriques d'un moteur à courant continu	22

Figure II.13. Schéma illustrant la conversion électromécanique parfaite.....	23
---	----

Chapitre III : Méthodes d'optimisation

Figure III.1. Schéma illustrant les divisions de la théorie de l'essaim de particules	26
Figure III.2. Schéma illustrant le principe de fonctionnement de la théorie de l'essaim de particules	26
Figure III.3. Organigramme GA	28
Figure III.4. Topologies de voisinage.....	29
Figure III.5. Schéma illustrant la modélisation de la théorie de l'essaim de particules (PSO)	30
Figure III.6. Schéma illustrant l'architecture de l'optimisation par essaim de particules (PSO)	31
Figure III.7. Calcul de la dimension particulaire moyenne pour N particules	34
Figure III.8. Organigramme de l'algorithme PSO	37
Figure III.9. Schéma de principe du déplacement d'une particule	38

Chapitre IV : Simulation sous MATLAB/Simulink et Résultats

Figure IV.1. Schéma synoptique global du système de pompage photovoltaïque optimisé par MPPT-PSO.....	40
Figure IV.2. Schéma global de simulation du système de pompage photovoltaïque sous Simulink	40
Figure IV.3. Schéma de simulation du bloc générateur photovoltaïque (GPV)	41
Figure IV.4. Schéma de simulation du hacheur Boost avec commande MPPT-PSO.....	42
Figure IV.5. Schéma de simulation du bloc batterie et son circuit de commutation	43
Figure IV.6. d'évolution de la tension du générateur photovoltaïque sous un profil d'éclairement variable.	43
Figure IV.7. Courbe de comportement de la batterie et du signal de commande du switch en fonction du temps.	44
Figure IV.8. Courbe des performances dynamiques du moteur électrique (vitesse, couple et courant) en fonction du temps.	45
Figure IV.9. Courbe de réponse de la vitesse du moteur sous variation de l'irradiance solaire en fonction du temps.	46

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

Tableau I.1. Comparaison entre les types d'onduleurs..... 8

Tableau I.2. L'avantage et inconvénients..... 12

Chapitre II : Modélisation des composants

Tableau II.1. Caractéristiques électriques du générateur PV sous les conditions standards 15

Chapitre IV : Simulation sous MATLAB/Simulink et Résultats

Tableau IV.1. Comparaison des Systèmes Énergétiques pour une Ferme Isolée du Réseau Électrique
..... 46

Liste des abréviations et des symboles

SH: Système hybride.

SHSER: Système hybride a sources d'énergie renouvelables.

GD: Générateurs diesels.

CC: Courant continu.

CA: Courant alternatif.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PV: Photovoltaïque.

Pb: technologie au Plomb.

SOC: état dcharge.

DoD: profondeur de décharge DoD.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

MCC: Le moteur à courant continu.

ELC: Electronic Load Controller.

PAC: Pile À Combustible.

PSO: d'optimisation par essaim de particules.

GA: Algorithme Génétique.

FIPS: Fully Informed Particle Swarm.

FCPSO: Fast Convergence Particle Swarm Optimization

PMD: Particle Mean Dimension

EMS: Energy Management System

GPV: Générateur Photovoltaïque

PWM: Pulse Width Modulation

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Introduction	2
I.1. Définition	2
I.2. Classification.....	3
I.3. Les différentes structures des systèmes hybrides	3
I.3.1. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel	3
I.3.2. Système hybride éolien/stockage	3
I.3.3. Systèmes éolien/source conventionnelle.....	4
I.3.4. Systèmes photovoltaïque/éolien/stockage	4
I.3.5. Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	5
I.4. Etat de l'art des architectures pour systèmes d'énergie hybride	5
I.4.1. Architecture à bus AC.....	5
I.4.2. Architecture mixte à bus DC/AC	5
I.4.3. Architecture à bus DC.....	6
I.5. Choix des convertisseurs de puissance.....	7
I.5.1. Les hacheurs.....	7
I.5.2. Les onduleurs	8
I.6. Les différentes configurations des systèmes PV-GE	8
I.6.1. Systèmes hybrides PV/diesel série.....	9
I.6.2. Systèmes hybrides PV/diesel avec interrupteur	9
I.6.3. Systèmes hybrides PV/diesel parallèle	10
I.6.4. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	10
I.6.5. Système de batteries pour la régulation et le stockage de l'énergie	11
I.7. Avantages et inconvénients d'un système hybride	12
Conclusion.....	12
Introduction	13
II.1. Modèle du générateur photovoltaïque	13
II.1.1. Présentation de générateur photovoltaïque choisi.....	15
II.1.2. Racordement en série	15
II.1.3. Raccordement en parallèle	16
II.2. Modèle de la batterie	16
II.2.1. Equation électrique de charge et décharge.....	17
II.2.2. Equation de l'état de charge.....	17
II.3. Modèles des convertisseurs statiques.....	19

II.3.1. Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel de la batterie	19
II.3.1.1. Séquences de fonctionnement et équations d'état.....	19
II.3.2. Modèle de l'onduleur de tension.....	21
II.4. Modélisation d'un moteur à courant continu à excitation séparée.....	21
II.4.1. Modèle électrique.....	22
II.4.2. Conversion électromécanique	23
Conclusion.....	24
Introduction	25
III.1. Définition De Method Optimisation par Essaims Particulaires	25
III.2. Principe De Method Optimisation.....	26
III.3. Formulation	27
III.3.1. Optimisation par Essaims Particulaires	27
III.3.2. Algorithme Génétique.....	28
III.3.3. CONFIGURATION DES PARAMÈTRES.....	29
III.3.4. Nombre de particules	29
III.3.5. Taille et topologie de voisinage	29
III.4. Amélioration des algorithmes PSO	29
III.5. Confinement des particules	30
III.6. Coefficient de constriction	31
III.7. Coefficient d'inertie	32
III.8. Stratégie Fully Informed Particle Swarm (FIPS)	33
III.9. Algorithme TRIBES.....	33
III.10. Optimisation par essaim de particules à convergence rapide	34
III.11. Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules.....	35
III.12. Algorithme de PSO avec Coefficients d'Accélération variable PSO-TVAC.....	36
III.14. Les Caractéristiques principales.....	37
Conclusion.....	38
Introduction	39
IV.1. La méthode d'optimisation par essaim de particules (Pso)	39
IV.2. Parte pratique (simulation de Matlab).....	40
IV.2.1. Bloc Générateur Photovoltaïque (GPV)	41
IV.2.2. Schéma de commande.....	41
IV.2.3. Le système de stockage d'énergie	42
IV.3. Résulta.....	43
IV.3.1. Bloc Générateur Photovoltaïque	43

SOMMAIRE

IV.3.2. Bloc Batterie	44
IV.3.3. Bloc moteur.....	45
IV.4. Discussion des résultats et durabilité du projet	46
Conclusion.....	47
Conclusion générale	49

Introduction générale

Introduction générale

Face aux enjeux énergétiques, les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, jouent un rôle clé dans la transition énergétique. Le pompage photovoltaïque représente une solution durable et économique pour les zones rurales isolées du réseau, remplaçant les systèmes polluants à énergie fossile. Il repose sur la conversion directe du rayonnement solaire pour alimenter un moteur couplé à une pompe [1].

Néanmoins, l'efficacité des panneaux PV reste limitée et tributaire des fluctuations climatiques, particulièrement en milieu saharien ; ce qui perturbe le point de fonctionnement optimal et nuit au rendement global. Pour garantir la continuité de l'alimentation en eau, nous avons proposé l'intégration d'un système de stockage par batteries, fonctionnant en coordination avec le générateur PV. Ce défi exige une gestion rigoureuse des flux énergétiques afin de maintenir une vitesse constante du moteur et de stabiliser les performances. Face à ces variations, les approches classiques s'avérant insuffisantes, L'usage d'un algorithme métaheuristique via la méthode PSO devient indispensable pour assurer des décisions en temps réel.

L'objectif principal de ce travail est l'étude, la modélisation et l'optimisation d'un système hybride intelligent de pompage d'eau. Pour traiter cette problématique, ce mémoire sera structuré en quatre chapitres complémentaires, où le premier chapitre sera consacré à une introduction générale sur les systèmes hybrides, leurs différentes architectures énergétiques et les convertisseurs de puissance associés, tandis que le deuxième chapitre développera la modélisation mathématique et physique précise de chaque composant du système, à savoir le générateur PV, les batteries, le moteur DC et la pompe. Ensuite, le troisième chapitre exposera les fondements théoriques et conceptuels de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) ainsi que ses variantes, pour que le quatrième chapitre porte enfin sur la simulation numérique du système global sous l'environnement MATLAB/Simulink, en y intégrant l'algorithme PSO pour la gestion des flux d'énergie et le suivi du point de puissance maximale (MPPT), suivie d'une analyse approfondie des résultats obtenus. »

Chapitre I :

Généralités

sur les

systèmes

hybrides

Introduction

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgente la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [2], [3].

Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit [4].

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH)[5].

I.1. Définition

Un système hybride a sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut-être considéré comme un système hybride [6].

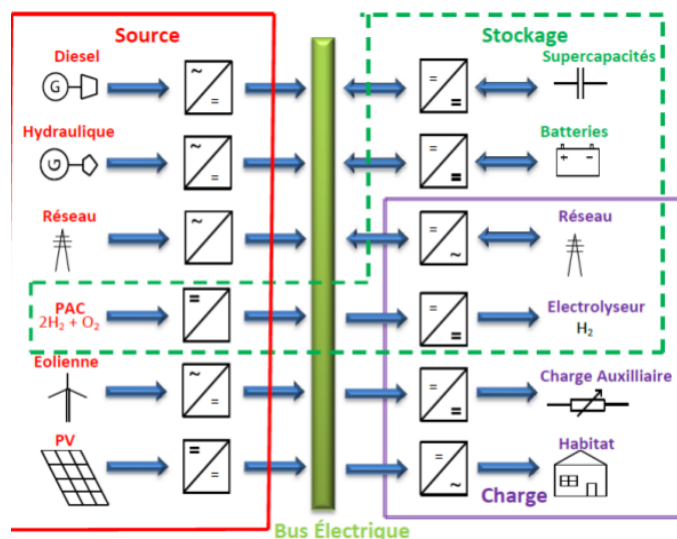


Figure I.1. Schéma général du système d'énergie hybride

I.2. Classification

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique: refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc... [6]

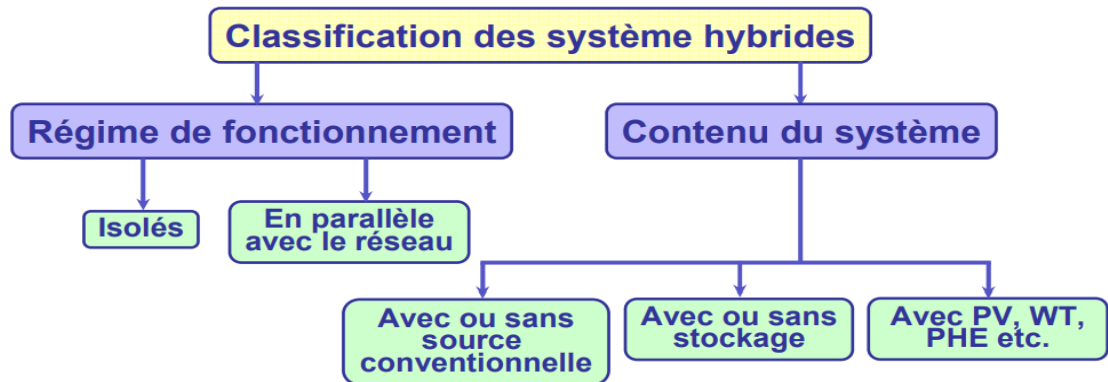


Figure I.2. Classifications des systèmes hybrides

I.3. Les différentes structures des systèmes hybrides

I.3.1. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommée puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie. On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York. Ces systèmes alimentent des maisons et des refuges ou des villages. Ils peuvent être autonomes ou interconnectés avec le système électrique du pays. Le stockage peut être sous forme de batteries, de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible ou d'une combinaison des deux [7].

I.3.2. Système hybride éolien/stockage

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne [8], soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent [9]. Le réseau

électrique peut être de grande taille, cas des Etats-Unis, ou de faible taille (réseau insulaire). Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage, soit un bâtiment (hôtel) et même un village. Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, Lorsque le système opère en parallèle avec le réseau électrique, la stratégie de gestion de la puissance joue un rôle important [10].

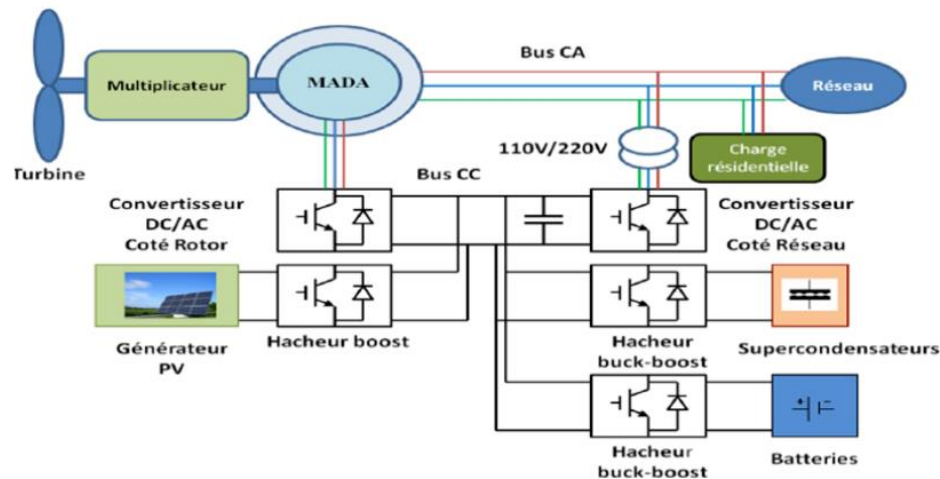


Figure I.3. Schéma illustrant Système hybride éolien/stockage

I.3.3. Systèmes éolien/source conventionnelle

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel. De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride. Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles – petites comme les îles Canari en passant par des îles moyennes comme la Corse jusqu'aux grandes îles comme l'Angleterre [11]. Les charges, alimentées par le système hybride, sont de différents types : des habitations isolées, des bâtiments de logements des bâtiments publics, des villages ou même des îles. Dans ces cas, le système hybride fonctionne en régime autonome. Lorsque le système hybride fonctionne en régime autonome, il comprend souvent un stockage qui peut être idéal, classique par batteries ou innovant par utilisation d'un électrolyseur et d'une pile à combustible avec stockage d'hydrogène. [12]

I.3.4. Systèmes photovoltaïque/éolien/stockage

Ce type de système hybride associe des panneaux photovoltaïques et des aérogénérateurs (éoliennes) à un banc de stockage d'énergie (généralement des batteries électrochimiques).

L'objectif principal de cette configuration est d'éliminer totalement l'utilisation des combustibles fossiles. Le système de stockage joue un rôle crucial de régulation : il emmagasine l'excès d'énergie produit pendant les périodes de forte insolation ou de vents violents, et le restitue pour alimenter la charge lorsque la production renouvelable est insuffisante ou nulle (pendant la nuit ou en l'absence de vent), assurant ainsi une autonomie complète et propre [13]

I.3.5. Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe sont présentées quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage.

I.4. Etat de l'art des architectures pour systèmes d'énergie hybride

I.4.1. Architecture à bus AC

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA) [14], Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus.

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En courant alternatif

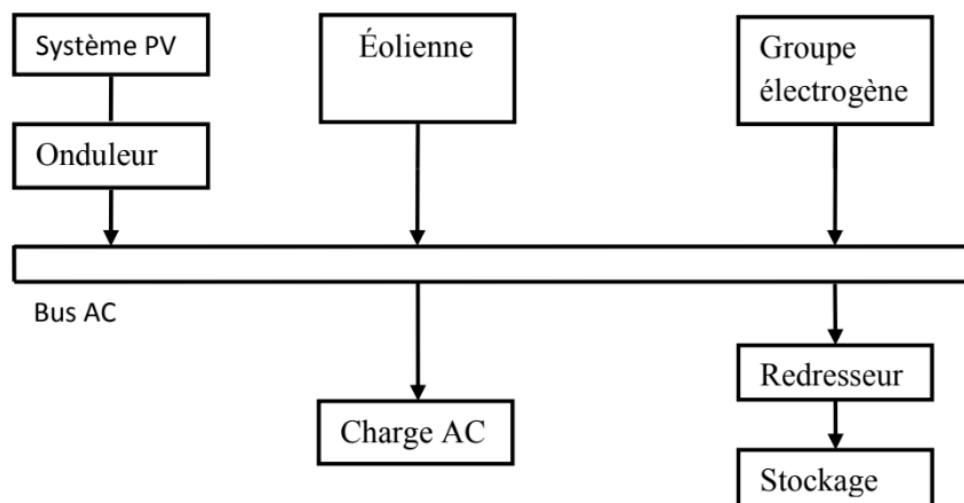


Figure I.4. Architecture multi-sources couplée au bus alternatif

I.4.2. Architecture mixte à bus DC/AC

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la Figure I.4. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette

configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de GD et de l'onduleur. Le ou 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, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) Quand il y a un surplus d'énergie de la part 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. Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte (bus à CA et bus à CC), avec des batteries de stockage, est très répandue [15]

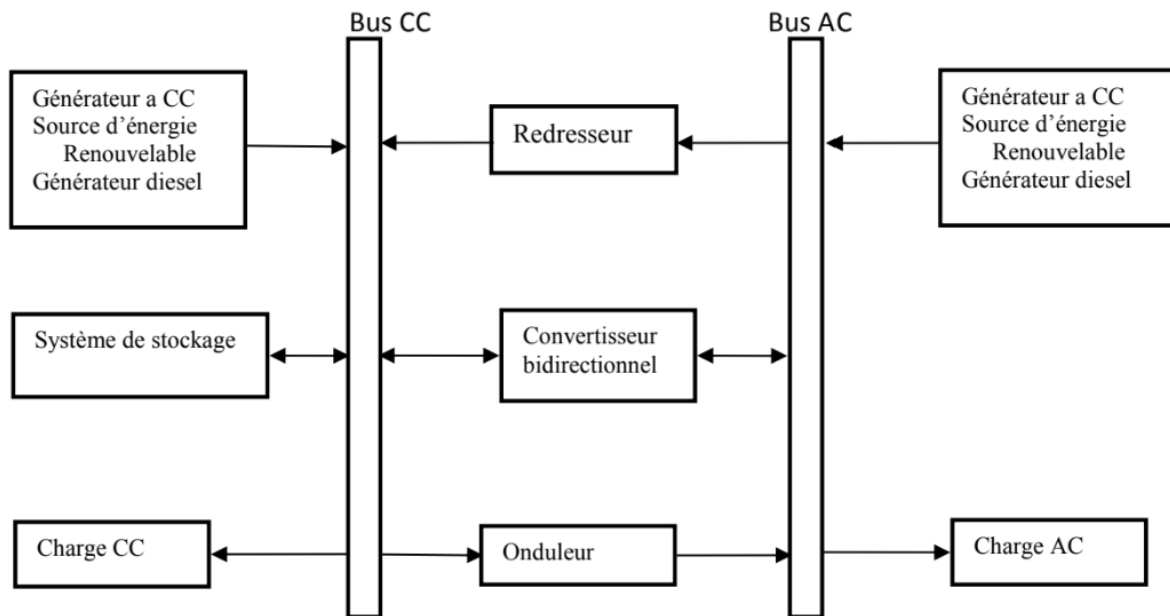


Figure I.5. Architecture multi-sources couplée au mixte à bus à CC/AC

I.4.3. Architecture à bus DC

Dans le système hybride présenté dans la Figure I.5., la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu

(CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges

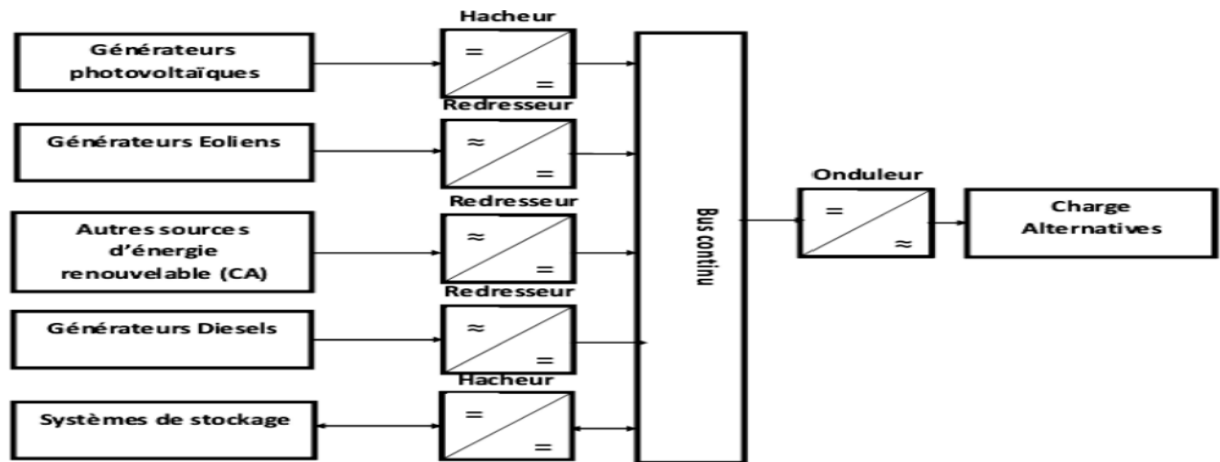


Figure I.6. Architecture multi-sources couplée au bus continu

I.5. Choix des convertisseurs de puissance

Encore appelés convertisseurs statiques, ils jouent un rôle d'interface entre les sources d'énergie et les équipements qui consomment cette dernière. Ils permettent de contrôler les paramètres électriques des systèmes auxquels ils appartiennent. Pour les applications contraignantes nécessitant une tolérance aux défauts, une architecture adéquate pour les convertisseurs est nécessaire. Ce paragraphe présente d'une part les grandes classes de convertisseurs existants et d'autre part des topologies émergentes de la littérature pour des applications contraignantes.

I.5.1. Les hacheurs

Les hacheurs (convertisseurs CC/CC) jouent un rôle d'adaptation d'impédance et de régulation de tension entre les sources et le bus CC. Dans notre système, il convient de distinguer deux types de hacheurs :

Hacheur unidirectionnel (Boost) : Utilisé pour le générateur photovoltaïque afin d'élever la tension des panneaux jusqu'à la valeur du bus CC tout en extrayant la puissance maximale via l'algorithme MPPT. Le flux d'énergie est strictement unidirectionnel (du PV vers le bus).

Hacheur bidirectionnel en courant (Buck-Boost) : Utilisé spécifiquement pour l'interface du système de stockage (batteries / supercondensateurs). Ce convertisseur permet un transfert d'énergie réversible : il fonctionne en mode abaisseur (Buck) pour charger le stockage à partir du bus, et en mode élévateur (Boost) pour décharger le stockage et alimenter le bus lorsque les sources renouvelables sont insuffisantes. [16]

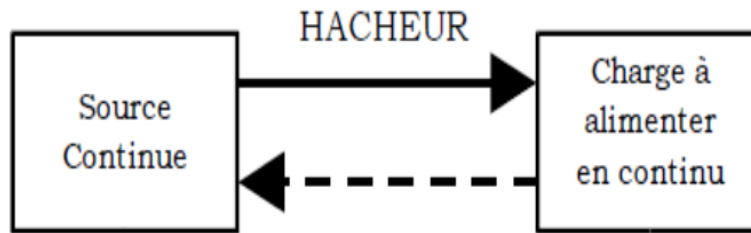


Figure I.7. Principe de conversion DC-DC par un hacheur

I.5.2. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique de type continu-alternatif (DC/AC) ; il permet d'alimenter une charge en courant alternatif à partir d'une source continue. On distingue deux types d'onduleurs : onduleur de tension et onduleur de courant.

Tableau I.1. Comparaison entre les types d'onduleurs

Onduleur	Interrupteurs électroniques	Source continue d'alimentation	Charge alimentée en alternatif
De tension	Bidirectionnels en courant	Source de tension.	La tension est imposée, le courant dépend de la charge.
De courant	Unidirectionnels en courant	Source de courant.	Le courant est imposé, la tension dépend de la charge

I.6. Les différentes configurations des systèmes PV-GE

Le champ photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation domestique Exige le plus souvent du courant alternatif c'est pourquoi il est souvent nécessaire d'adjoindre au système un onduleur. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille en parallèle ou en alternance avec le générateur diesel On distingue les configurations suivantes:

- Système hybride PV-GE série;
- Système hybride PV-GE commuté;
- Système hybride PV-GE parallèle. [17]

I.6.1. Systèmes hybrides PV/diesel série

Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diesel est tout d'abord redressée puis convertie de nouveau en alternatif pour être fournie à la charge, ce qui implique des pertes de

conversion significatives. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le diesel est arrêté. La puissance en courant continu fournie par le champ et la batterie est convertie en courant alternatif par l'onduleur. De plus, il faut noter que pour la plupart des systèmes de ce type, le rendement du système est diminué à cause du transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie, augmentant ainsi le nombre de cycles charge- décharge Figure I.7 [18]

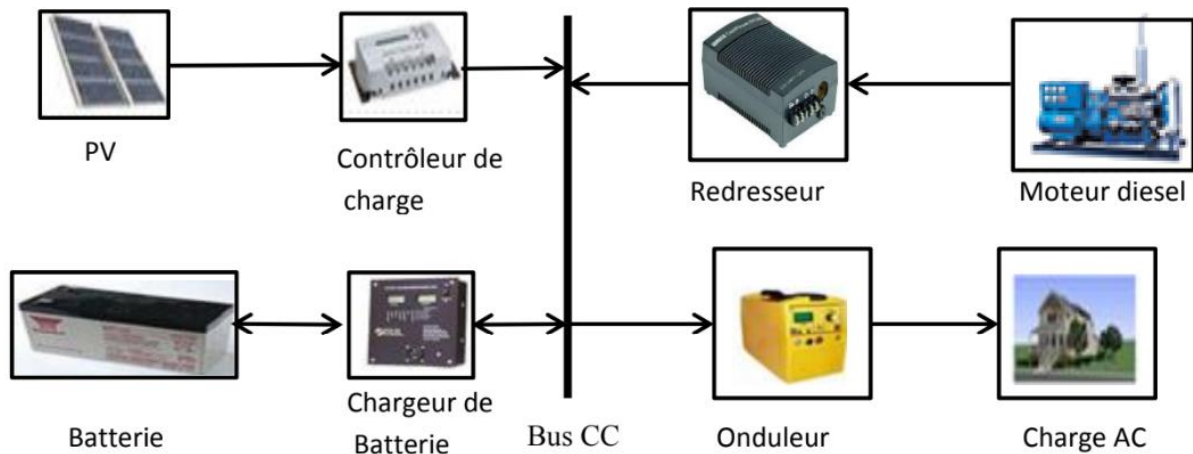


Figure I.8. Systèmes hybrides PV/diesel

I.6.2. Systèmes hybrides PV/diesel avec interrupteur

Dans ce système et d'après le schéma de la Figure I.8. la batterie peut être chargée par le champ PV et le générateur diesel par l'intermédiaire d'un redresseur. La charge peut être alimentée directement par le GD. Si la puissance délivrée par ce dernier excède celle de la charge, cet excès d'énergie sera utilisé pour recharger la batterie. Durant la période de faible demande d'énergie, le générateur diesel est interrompu, la charge est alimentée par le champ PV et la batterie via l'onduleur pour alimenter la charge de nature alternative. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride L'étude de l'efficacité de conversion mène à dire que ce système est plus efficace que le série [19]

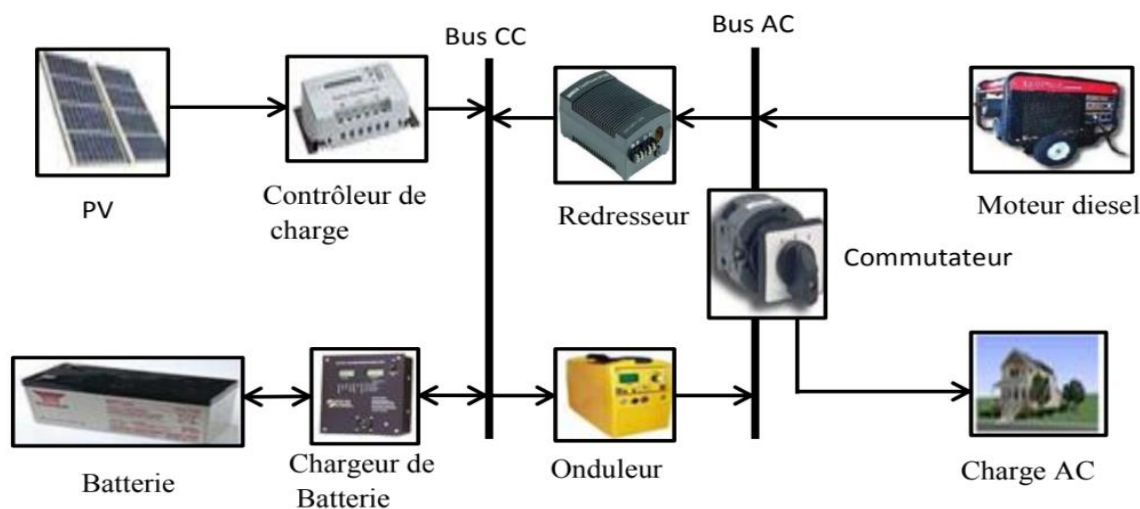


Figure I.9. Systèmes hybrides PV/diesel avec interrupteur

I.6.3. Systèmes hybrides PV/diesel parallèle

La dernière configuration d'un système hybride (photovoltaïque/source conventionnelle) est la connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont connectées en série avec le convertisseur bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément [20]

Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure I.9.

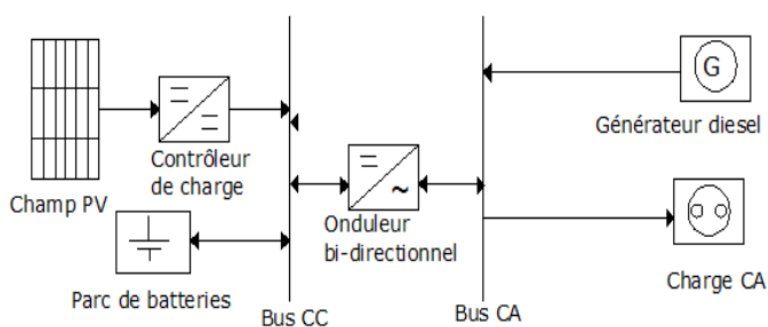


Figure I.10. Systèmes hybrides PV/diesel parallèle

I.6.4. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Voir Figure I.10.), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le

circuit En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants : • Exploitation du système sans interruption. • Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système. • Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques [21].

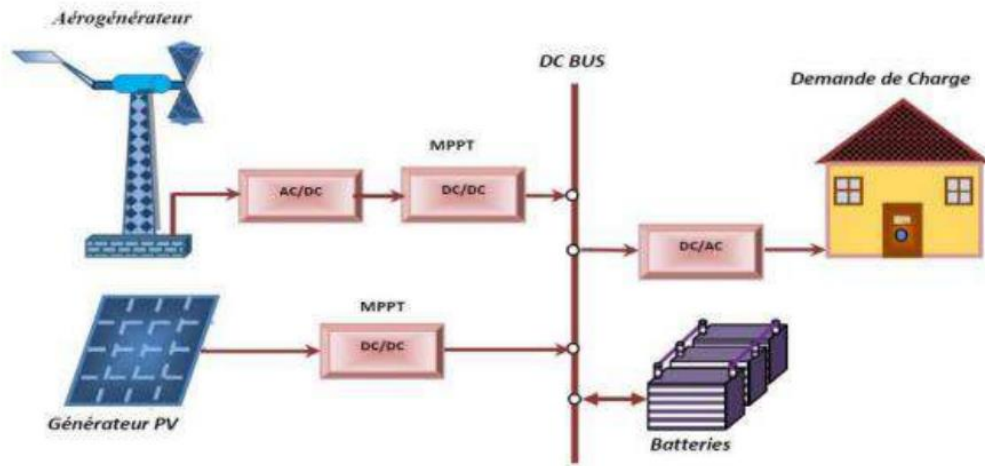


Figure I.11. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

I.6.5. Système de batteries pour la régulation et le stockage de l'énergie

La partie batterie est composée de plusieurs batteries, qui jouent deux rôles dans le système : la régulation de l'énergie et l'équilibrage de la charge. Elle convertit l'énergie électrique produite par le système de production d'énergie éolienne et le système de production d'énergie photovoltaïque en énergie chimique et la stocke pour une utilisation ultérieure lorsque l'approvisionnement en énergie est insuffisant.

Le système hybride éolien-solaire peut fonctionner dans les trois modes suivants en fonction des changements de la puissance éolienne et du rayonnement solaire : l'éolienne fournit seule l'énergie à la charge ; le système de production d'énergie photovoltaïque fournit seul l'énergie à la charge ; l'éolien La partie batterie est composée de plusieurs batteries, qui jouent deux rôles dans le système: la régulation de l'énergie et l'équilibrage de la charge. Elle convertit l'énergie électrique produite par le système de production d'énergie éolienne et le système de production d'énergie photovoltaïque en énergie chimique et la stocke pour une utilisation ultérieure lorsque l'approvisionnement en énergie est insuffisant.

Le système hybride éolien-solaire peut fonctionner dans les trois modes suivants en fonction des changements de la puissance éolienne et du rayonnement solaire : l'éolienne fournit seule l'énergie à la charge ; le système de production d'énergie photovoltaïque fournit seul l'énergie à la charge ; l'éolienne et le système de production d'énergie photovoltaïque fournissent ensemble l'énergie à la

charge ne et le système de production d'énergie photovoltaïque fournissent ensemble l'énergie à la charge. [22]

I.7. Avantages et inconvénients d'un système hybride

Tableau I.2. L'avantage et inconvénients

Avantages	Inconvénients
➤ Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation du carburant ; ➤ Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel ; ➤ L'onduleur peut fournir au consommateur la tension désirée en forme et en valeur.	➤ L'apparition d'une coupure instantanée lors de la commutation des sources ; ➤ Le générateur diesel et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système ; ➤ Une construction complexe.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le concept de **système hybride énergétique**, ainsi que ses principaux types, tout en mettant en évidence ses avantages, ses inconvénients et son principe de fonctionnement. Cette étude nous a permis de comprendre le rôle essentiel du système hybride dans l'intégration de différentes sources d'énergie, notamment les énergies renouvelables, afin d'améliorer la continuité et la fiabilité de la production électrique.

Ce travail introductif nous prépare à la suite de l'étude, où nous aborderons le calcul et le dimensionnement des différents composants du système hybride, ainsi que les méthodes de leur association et de leur interconnexion. Nous nous intéresserons également aux aspects techniques de conception, tels que le choix des équipements, l'analyse du bilan énergétique et l'intégration des systèmes de stockage et de contrôle, dans le but d'assurer une alimentation énergétique stable, efficace et durable.

Chapitre II :

Modélisation des

composants

Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'établir les modèles mathématiques et physiques précis des différents constituants du système hybride de pompage d'eau. La modélisation constitue l'étape fondamentale préalable aux phases de simulation et de conception, car elle permet de comprendre le comportement dynamique de chaque élément du système; à commencer par le générateur photovoltaïque et son interaction avec les conditions climatiques variables, jusqu'au système de stockage d'énergie basé sur les batteries pour garantir la continuité du service. De plus, ce chapitre expose les équations des convertisseurs de puissance (DC/DC) qui assurent un transfert d'énergie optimal, ainsi que la modélisation de la pompe à eau à courant continu (DC Water Pump) afin d'analyser ses performances en termes de débit et de hauteur manométrique en fonction de la puissance disponible.

II.1. Modèle du générateur photovoltaïque

L'assemblage de plusieurs modules solaires est appelé : générateur photovoltaïque, Où chaque module se compose de plusieurs cellules, la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant [1]

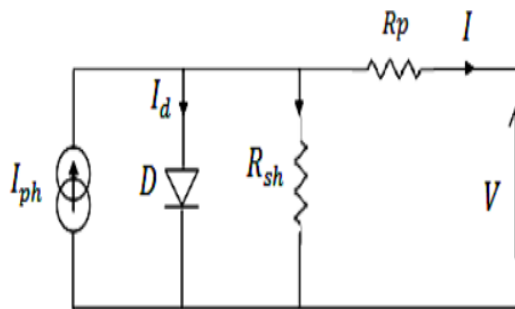


Figure II.1. Schéma équivalent d'une cellule solaire

Ce dernier est considéré comme le plus classique dans la littérature, où il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt) (**Figure II.1.**). Généralement pour les cellules cristallines, la résistance shunt est grande, et le modèle se réduit alors à quatre paramètres (I_{cc} , I_0 , R_p , V_{th}).

La caractéristique (I-V) est modélisée par une équation non linéaire de forme implicite :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp \frac{(V_{th}V + R_p I)}{V_{th}} - 1 \right] \quad \text{II. 1}$$

Pour tracer la caractéristique (I-V), il faut tenir compte de trois points de mesure, fournie par le constructeur :

- Le point de court-circuit ($I_{CC}.0$).
- Le point à circuit ouvert ($0,V_{CC}$).
- Le point optimum (I_{OP} ,V_{OP}) où le module délivre sa puissance maximale.

La tension thermique V_{TH} et le courant d'obscurité I_0 s'identifient par :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_p I_{op} - V_{oc}}{\log \left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}} \right)} \quad \text{II.2}$$

$$I_0 = (I_{cc} - I_{op}) \exp \left[- \frac{(V_{op} + R_p I_{op})}{V_{th}} \right] \quad \text{II.3}$$

Les paramètres du générateur sont liés à ceux du module par les relations suivantes :

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc}(\text{module})$$

$$V_{th} = N_s \cdot V_{th}(\text{module})$$

$$r_s = \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \cdot R_p(\text{module})$$

$$I_0 = N_p \cdot I_0(\text{module})$$

$$V_{oc} = N_s \cdot V_{oc}(\text{module})$$

$$V_{op} = N_s \cdot V_{op}(\text{module})$$

Pour d'autres niveaux d'éclairements et de températures, on fait recours aux lois suivantes :

$$\bullet \quad \Delta T = T - T_{ref} \quad \text{II.3}$$

$$\bullet \quad \Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{ccref} \quad \text{II.4}$$

$$\bullet \quad \Delta V = -\beta \Delta T - r_s \Delta I \quad \text{II.5}$$

Donc les nouvelles valeurs des courants et de tensions sont sous la forme :

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad \text{II.6}$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad \text{II.7}$$

II.1.1. Présentation de générateur photovoltaïque choisi

Le module photovoltaïque « SYP 175S-50M » comporte 72 cellules solaires monocristalline de dimension 1580*808*50mm. Les caractéristiques électriques de ce panneau photovoltaïque sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique : AM 1.5, Température de cellule : 25°C) [32] sont données dans le Tableau suivant : [2]

Tableau II.1. Caractéristiques électriques du générateur PV sous les conditions standards.

Caractéristiques	SYP175S-50M
Puissance maximale (Pmax)	175W
Tension au point maximal (Vm)	36,00V
Courant au point maximal (Im)	4,86A
Tension de circuit ouvert (Vco)	44,80V
Courant de court circuit (Icc)	5,17A
Rendement de module	13,62%
Coefficient de température de Pmax	-0,50%/°C
Coefficient de température Vco	-0,37%/°C
Coefficient de température d'Icc	+0,02%/°C
Positive power tolérance	-0 ~ +3%

II.1.2. Raccordement en série

La figure suivante représente la méthode de connexion des panneaux solaires en série."

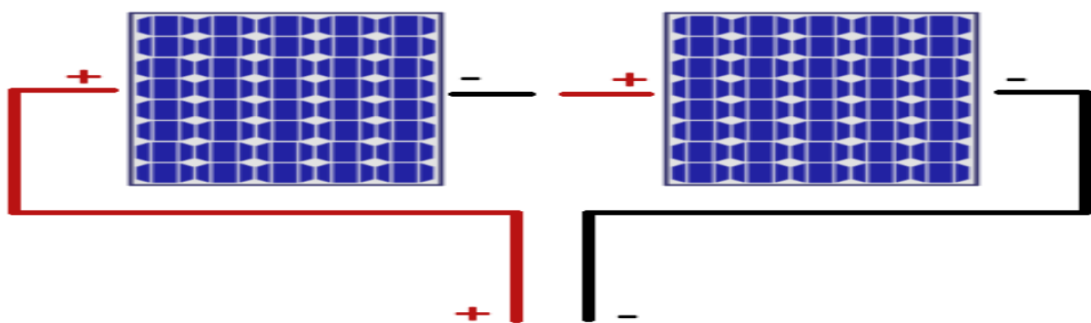


Figure II.2. Raccordement en série

II.1.3. Raccordement en parallèle

La figure suivante représente la méthode de connexion des panneaux solaires en dérivation.

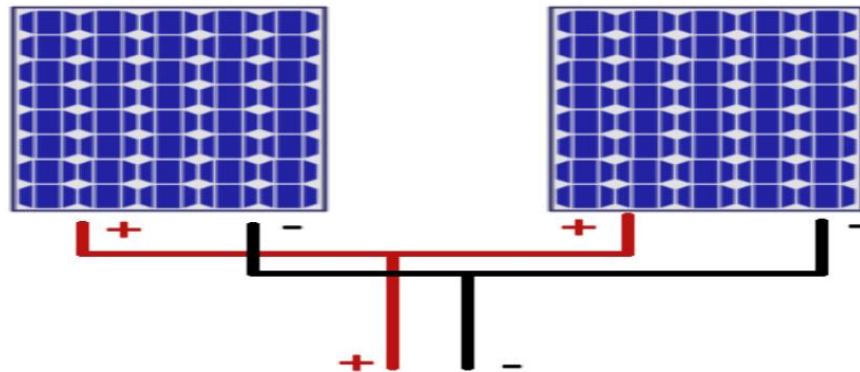


Figure II.3. Raccordement en parallèle

II.2. Modèle de la batterie

Toute batterie est un ensemble d'éléments ou des cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, où le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (**Figure II.2**) [3]

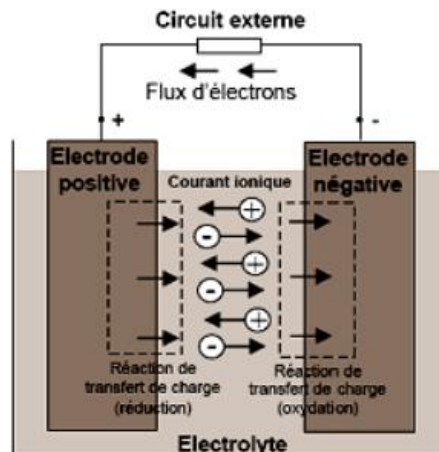


Figure II.4. Cellule électrochimique de base

Actuellement, la technologie la plus largement utilisée pour les applications photovoltaïques est la technologie au Plomb (Pb)[4]. C'est encore la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée. Nous présentons ici le modèle de cet accumulateur. Le modèle de la batterie adopté est celui permettant de prédire l'autonomie du système ascenseur, c'est-à-dire permettre à chaque instant

d'estimer l'énergie restante (état dcharge SOC_{bat} ou profondeur de décharge DoD) dans la batterie [5]. Le modèle choisi est, par conséquent, un modèle équivalent électrique (**Figure II.4**) composé d'une source de tension en série avec une résistance (résistance interne) [6]

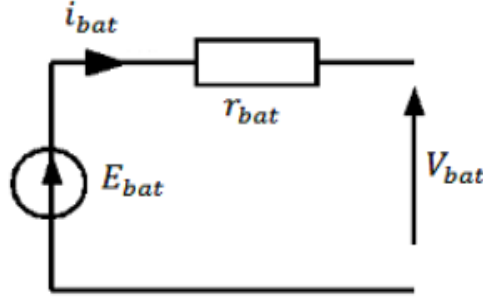


Figure II.5. Modèle équivalent électrique simple d'une batterie

II.2.1. Equation électrique de charge et décharge

La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série [7]:

$$V_{bat} = E_{bat} - r_{bat} \cdot i_{bat}$$

La tension à vide E_{bat} est (approximativement proportionnelle à l'état de charge de la batterie [8]. En considérant la variable DoD comme paramètre variant entre 0 et 1, selon que la batterie est chargée ou déchargée pleinement, l'équation présente un modèle valide l'équation électrique.

$$E_{bat} = n(2.15 - DOD \cdot (2.15 - 2.00))$$

$$DOD = 1 - SOC_{bat}$$

II.2.2. Equation de l'état de charge

L'état de charge, appelé SOC_{sc} caractérise la quantité d'énergie présente dans les supercondensateurs. Il vaut 100% lorsqu'ils sont complètement chargés et 0% lorsqu'ils sont chargés à leur valeur minimale. L'équation (II.4) présente le modèle adopté dans ce travail [9].

$$SOC_{sc} = \frac{V_{sc}^2}{V_{scmax}^2}$$

II.4

Pour tester ce modèle, le graphe (**Figure II.5.**) illustre les tracés de la tension du supercondensateur et son état de charge lors du passage en créneau du courant de décharge de 0 à 20A. Comme on peut le constater, la tension et l'état de charge diminuent. Il est à noter que la tension aux bornes du supercondensateur peut être développée en deux termes : une composante capacitive, associée à l'évolution de l'énergie stockée dans l'élément, et une composante résistive,

liée à la résistance série de l'élément. Le profil de charge sera similaire, mais dans un sens inverse de telle sorte que la tension aux bornes de la super capacité augmente avec le temps de charge.

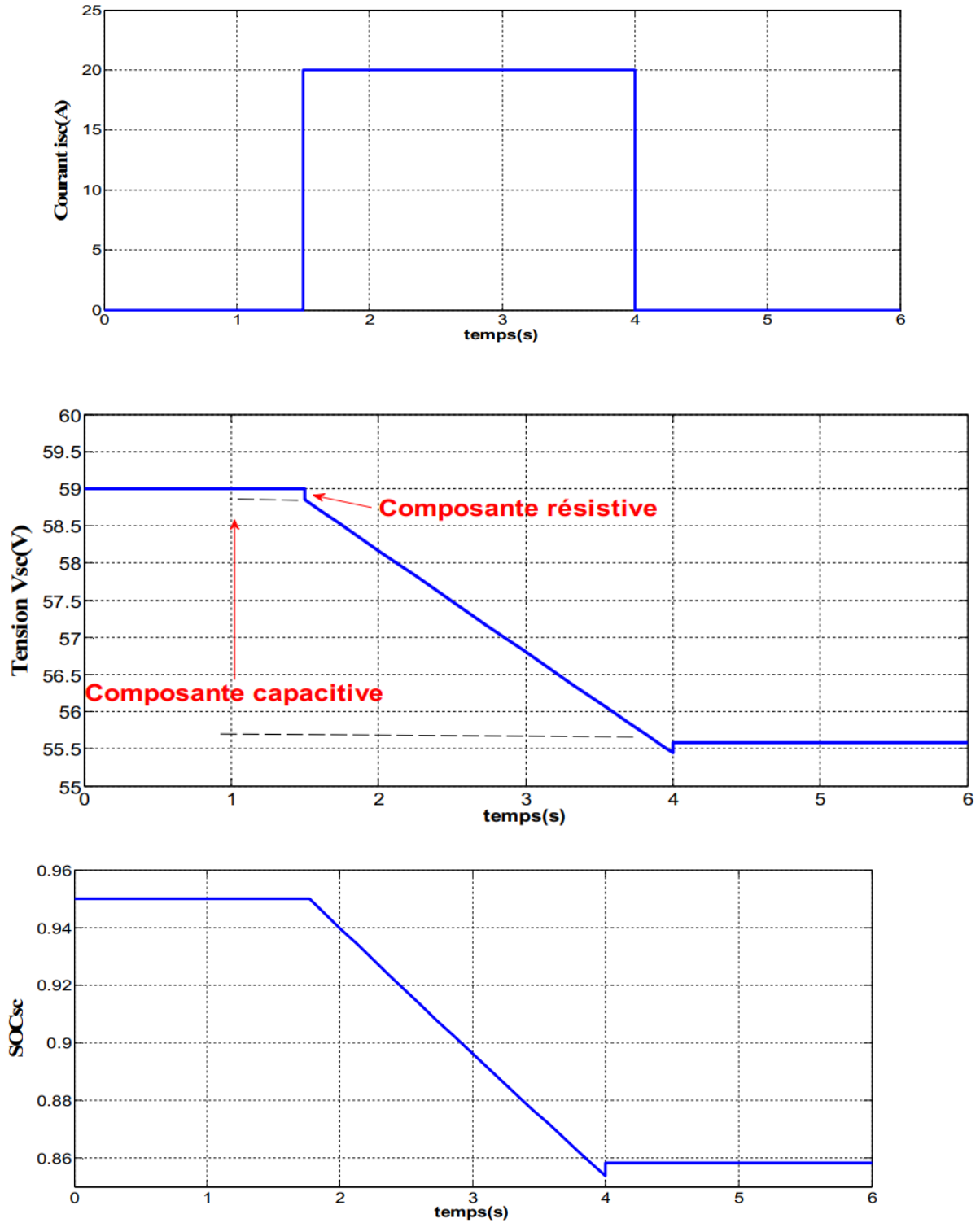


Figure II.6. Tension, courant et l'état de charge des supercondensateurs en cas de décharge

II.3. Modèles des convertisseurs statiques

Dans beaucoup de cas, nous avons intérêt à transformer le système original en un système continu qui représente macroscopiquement au mieux les comportements dynamiques et statiques du circuit. A cet effet, le comportement moyen est tout à fait adapté. Le modèle dit « moyen associé » trouve un vaste champ d'applications que ce soit en commande, en simulation ou encore en analyse des modes [10]. Le modèle moyen permet de répondre à trois exigences essentielles:

- ❖ Une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation.
- ❖ Une précision suffisante dans son domaine de validité.
- ❖ La possibilité d'utilisation en boucle fermée : possibilité éventuelle de passer en fonction de transfert.

II.3.1. Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel de la batterie

Dans le cas de l'hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus continu. Dans le cas de l'hacheur utilisé pour la charge/décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la Figure (**Figure II.6.**) [11]

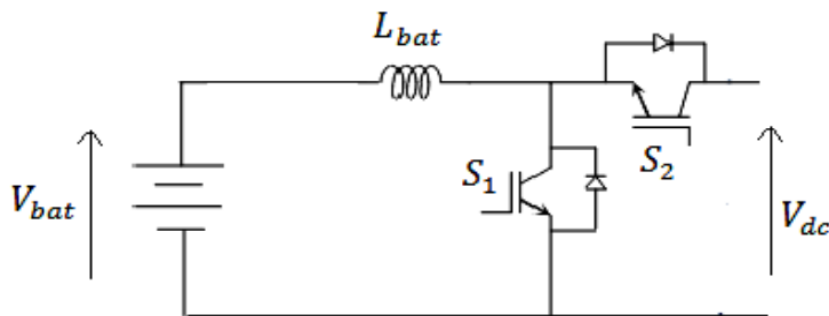


Figure II.7. Convertisseur associé aux batteries

II.3.1.1. Séquences de fonctionnement et équations d'état

De même, le modèle moyen du convertisseur réversible en courant de la batterie est adopté. Ce dernier permettra de tester les algorithmes de commande dans des modèles continus du système global. On distingue les deux phases de commutation des IGBT, représentés par un fil lorsqu'ils sont fermés et l'absence de connexion lorsqu'ils sont ouverts. Ainsi, la période de découpage (T_{pwm}) est scindée en deux [12]

- ✓ Première séquence de conduction $t \in [0; \alpha_{bat} \cdot TPWM]$

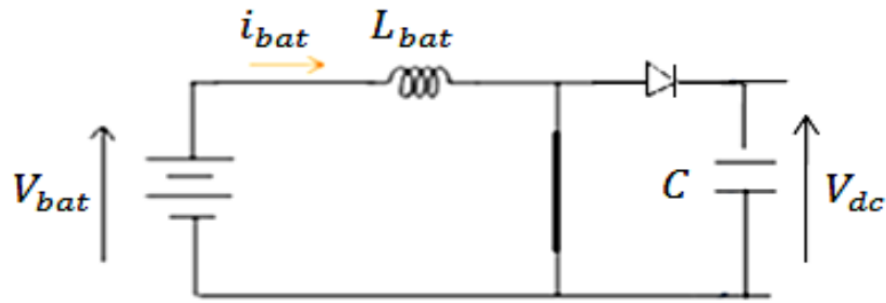


Figure II.8. Le schéma de principe de la première séquence de conduction

- ✓ L'équation dynamique du courant de la bobine s'écrit :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt}$$

II.5

- ✓ Deuxième séquence de conduction $t \in [\alpha_{bat} \cdot TPWM ; TPWM]$

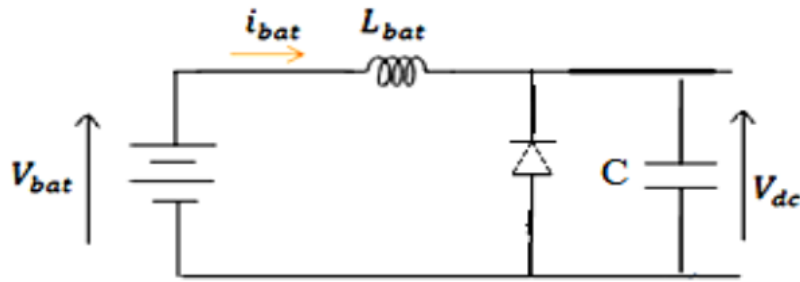


Figure II.9. Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction

La relation dynamique reliant tension de la batterie et le bus est donnée par :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + V_{dc}$$

II.6

La moyenne temporelle de ces deux équations donne ainsi un modèle moyen de ce convertisseur :

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat})V_{dc}$$

II.7

Le modèle de l'équation (II.7) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ($i_{bat} < 0$) et en décharge ($i_{bat} > 0$). Remarque : Le convertisseur bidirectionnel du supercondensateur est modélisé de façon analogue à celui de la batterie :

$$L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = V_{sc} - (1 - \alpha_{sc})V_{dc}$$

II.8

II.3.2. Modèle de l'onduleur de tension

Le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé monté en pont, alimentant le stator de la MSAP est donné par la (Figure II.8.).

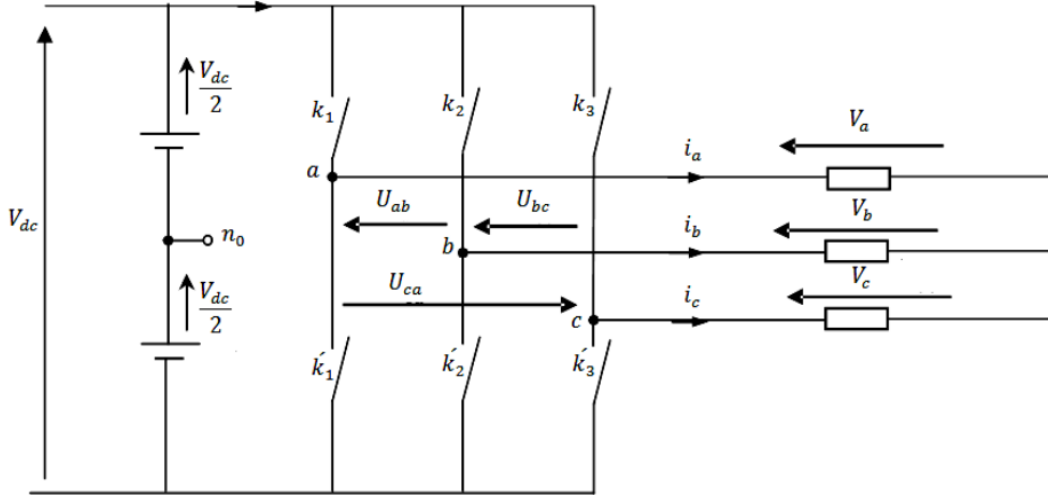


Figure II.10. Schéma de L'onduleur de Tension

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$U_{ab} = V_a - V_b = V_{dc}(D_u - D_v) \quad \text{II.9}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = V_{dc}(D_v - D_w) \quad \text{II.10}$$

$$U_{ca} = V_c - V_a = V_{dc}(D_w - D_u) \quad \text{II.11}$$

Les tensions v_a , v_b et v_c forment un système de tension triphasées équilibrées :

$$V_a = \frac{V_{dc}}{3}(2D_u - D_v - D_w) \quad \text{II.12}$$

$$V_b = \frac{V_{dc}}{3}(2D_v - D_u - D_w) \quad \text{II.13}$$

$$V_c = \frac{V_{dc}}{3}(2D_w - D_u - D_v) \quad \text{II.14}$$

II.4. Modélisation d'un moteur à courant continu à excitation séparée

Le moteur à courant continu (MCC) à excitation séparée demeure, malgré l'essor des machines à courant alternatif, un élément fondamental dans l'étude des systèmes d'entraînement électrique. Sa principale particularité réside dans le découpage magnétique total entre le circuit de l'inducteur (stator) et celui de l'induit (rotor), permettant ainsi une gestion indépendante du flux magnétique et de la puissance mécanique.

Cette configuration offre une flexibilité de commande exceptionnelle. En maintenant le flux constant, la vitesse du moteur devient directement proportionnelle à la tension d'induit, ce qui simplifie considérablement sa modélisation mathématique et son intégration dans des boucles de régulation automatique (asservissement).

Grâce à sa capacité à fournir un couple important dès le démarrage et à sa réponse dynamique prévisible, ce moteur est le candidat idéal pour illustrer les phénomènes du **régime transitoire** et pour être utilisé dans des applications industrielles de précision, telles que les systèmes de levage ou les bancs de traction, souvent pilotés par des convertisseurs statiques comme les hacheurs ou les ponts à thyristors.

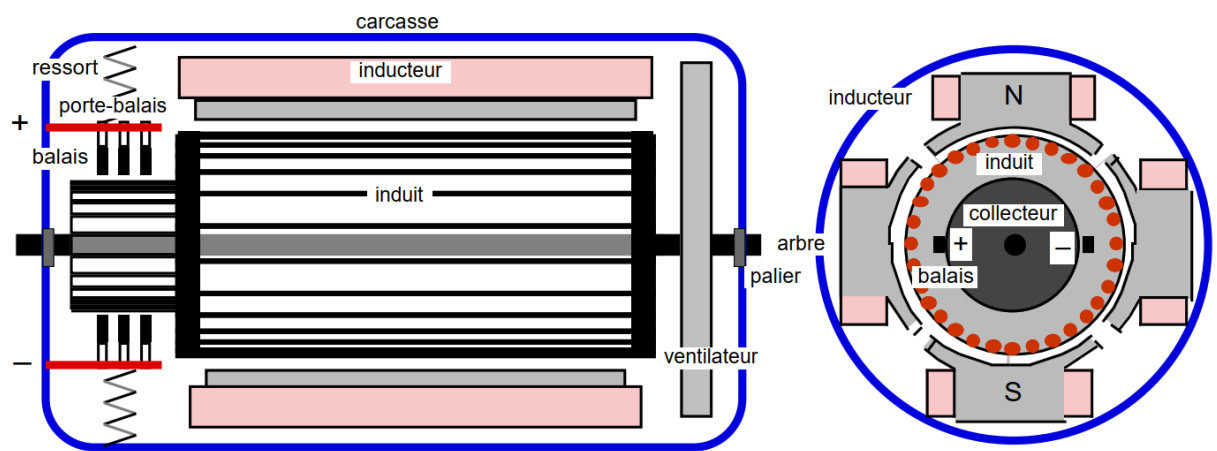


Figure II.11. Schéma Équivalent d'une MCC à Excitation Séparée

II.4.1. Modèle électrique

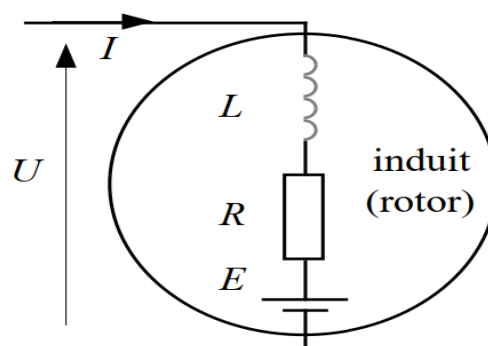


Figure II.12. Schéma illustrant les composants électriques d'un moteur à courant continu.

$$U = E + R \cdot I + L \frac{dI}{dt} \quad \text{loi des mailles} \quad \text{II.14}$$

$$E = k \cdot \Phi \cdot \Omega = K \cdot \Omega \quad \text{fcem (loi de Lenz)} \quad \text{II.15}$$

L'inducteur (bobinage ou aimant permanent) n'est pas représenté sur ce schéma. On s'intéresse uniquement aux MCC à excitation séparée, à flux $\sqrt{\text{constant}}$, commandées par l'induit. - (eq. 1) Si l'inductance de l'induit est négligeable, l'équation (II.14) se réduit à : $(U = E + R.I)$ Tenir compte de la présence éventuelle d'une *inductance de lissage*, connectée en série au moteur, nécessaire pour le bon fonctionnement de son alimentation (pont à thyristors ou hacheur).

(II.15) La loi détaillée est $E = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \cdot \Phi \cdot \omega$ où p est le nb de paires de pôles, a le nb de voies d'enroulement, N le nb de conducteurs de l'induit. On a donc : $E = K \cdot \omega$, où K dépend de la géométrie de la machine et du bobinage rotorique, ainsi que du flux dans l'entrefer

II.4.2. Conversion électromécanique

Conversion électromécanique parfaite :

$$C_m = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I}{\Omega} = K \cdot I \quad \text{II.16}$$

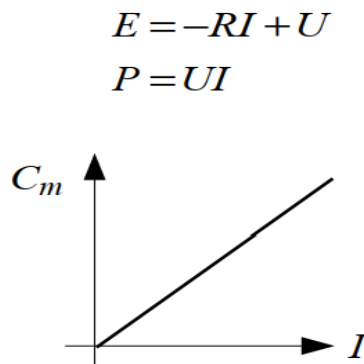
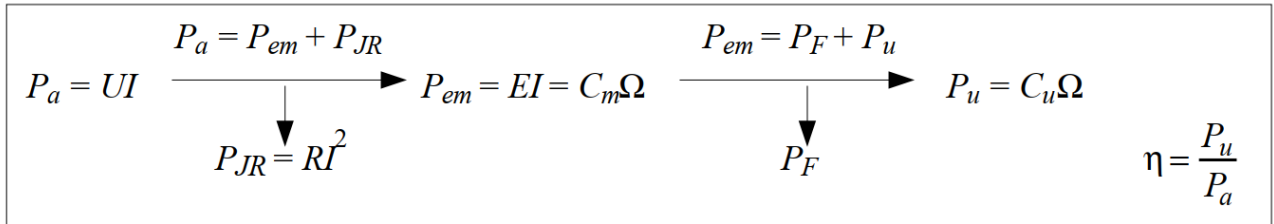


Figure.13. Schéma illustrant la conversion électromécanique parfaite.

 *Remarque :* dans la réalité on distingue : $E = K_E \cdot \omega$ et $C_m = K_C \cdot I$, où K_E est la constante électrique du moteur, et K_C sa constante mécanique. Mais dans la pratique, on peut confondre ces deux constantes et poser $K = K_E \text{ H } K_C$.

- ✓ Conversion électromécanique réelle : bilan des puissances
- Il est donné §C31 (conversion électromécanique réelle). Les pertes Joule électriques sont celles du rotor (P_{JR}) . De (II. 14) on obtient (en multipliant par I) : $UI = EI + RI^2$. Soit, en résumé



NB : on ne tient pas compte dans ce bilan de la puissance consommée par l'inducteur quand celui-ci est bobiné

Conclusion

Jusqu'à maintenant nous avons sélectionnée les modèles convenable et compatible à la l'architecture du système choisie. De nombreux paramètres sont modifiables permettant de prendre en compte les améliorations du système. Le système hybride PV-ELC-PAC étudié est conçu pour devoir générer, stocker et assurer l'énergie électrique aux charges. Il est simulé pour prévoir son exécution avant conception. Ce système est souvent installé dans des régions rurales et éloignées. L'optimisation du système est l'un des facteurs important, notamment les tailles composantes et la gestion d'énergie ainsi de divers paramètres influençant et remplit efficacement les conditions de system. Des modèles mathématiques des composants de système sont reliés ensemble pour former une représentation générale du système entier, par un contrôleur d'énergie central qui définit la manière dont les composants agit l'un sur l'autre pour simuler l'opération du système entier. Tous les composants du système ont été modélés et validés.

Chapitre III :

Méthodes

d'optimisation

Introduction

La méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique métaheuristique inspirée du comportement social et collectif des animaux, notamment le déplacement des oiseaux (bird flocking) ainsi que le mouvement des bancs de poissons (fish schooling). Comme il y a une interaction continue entre les membres de l'essaim, chaque particule remercie sa trajectoire en fonction de sa propre expérience et de l'expérience globale du groupe pour converger efficacement vers la solution optimale.

L'algorithme proposé par Kennedy et Eberhart cherche à simuler ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage et constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus. Le modèle qu'ils ont proposé a ensuite été étendu en un algorithme simple et efficace d'optimisation x ou des poissons pour la recherche de la nourriture

III.1. Définition De Method Optimisation par Essaims Particulaires

L'algorithme PSO est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires, Interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position découverte par le passé ainsi que vers la meilleure position découverte par les particules de son voisinage (ou de tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme). L'algorithme PSO comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration – exploitation [35]. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de l'espace à la recherche de bonnes solutions candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum. Le choix des paramètres reste en grande partie empirique. Une analyse complète de l'algorithme a été faite par Clerc et Kennedy [36]

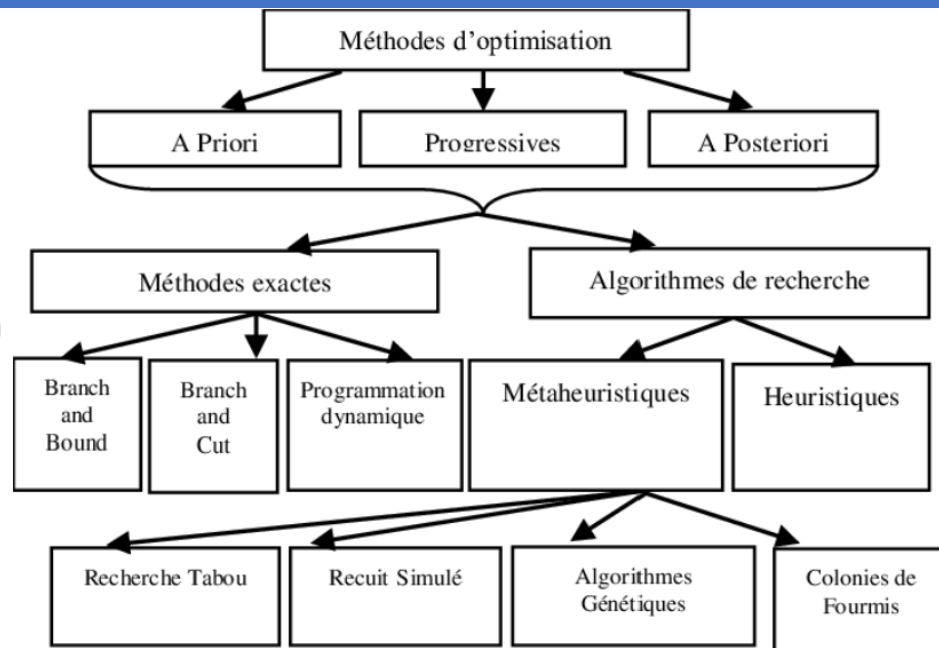


Figure III.1. Schéma illustrant les divisions de la théorie de l'essaim de particules.

III.2. Principe De Method Optimisation

L'optimisation par essaim de particules repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'espace de recherche et constituent chacune une solution potentielle. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. A partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage. A partir des optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va normalement converger vers la solution optimale globale du problème traité [37]

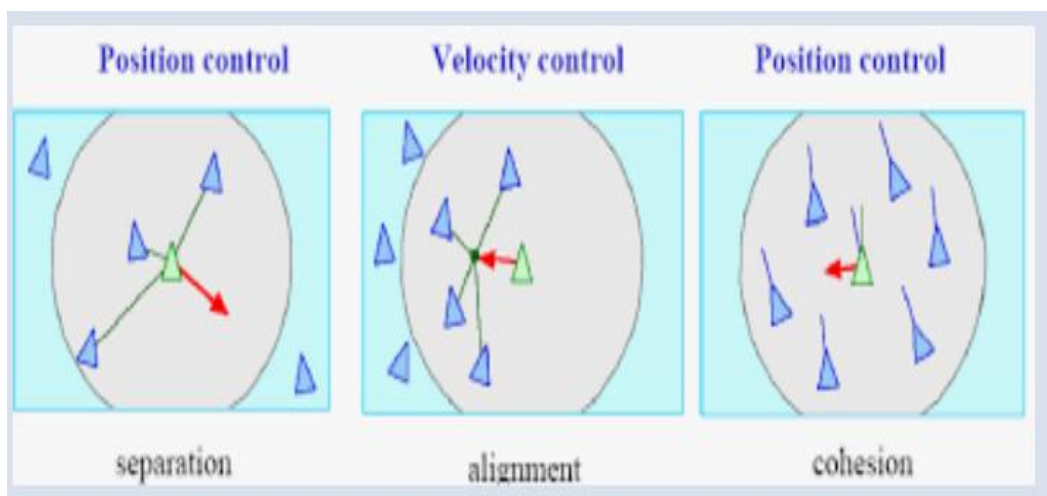


Figure III.2. Schéma illustrant le principe de fonctionnement de la théorie de l'essaim de particules.

III.3. Formulation

III.3.1. Optimisation par Essaims Particulaires

L'essaim de particules est constitué de n particules et la position de chaque particule représente une solution dans l'espace de recherche. Les particules changent d'état selon les trois principes suivants :

- Garder son inertie
- Changer d'état en fonction de sa meilleure position
- Changer d'état selon meilleure position du groupe. De chaque particule est affectée à la fois par meilleure position lors de son mouvement (expérience individuelle) et la position de la particule la plus optimiste dans ses environs (expérience globale). La mise à jour de la position $x_i(t)$ et la vitesse $v_i(t)$ d'une particule p_i est représentée par les équations 1 et 2

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [x_{pi}(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [g(t) - x_i(t)] \quad \text{III.1}$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad \text{III.2}$$

Où ω est l'inertie, c_1 et c_2 sont des coefficients constants fixés par l'utilisateur, r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires dans la plage $[0,1]$, tirés à chaque itération, $g(t)$ est la meilleure solution trouvée jusqu'à l'instant t et $x_{pi}(t)$ est la meilleure solution trouvée par la particule p_i . Soit $f(x)$ la fonction objective à optimiser (fitness) et n le nombre de particules. Les étapes essentielles de l'optimisation par essaim de particules sont présentées par l'algorithme suivant :

1. Initialisation aléatoire de la population et des vitesses des particules.
2. Trouver la meilleure valeur de fitness f à $t=0$.
3. Traitement Répéter jusqu'à fin d'itération. Répéter pour chaque particule. Générer la nouvelle valeur de la vitesse en utilisant l'équation 1 Calculer la nouvelle position en utilisant l'équation 2 Evaluation de la valeur de fitness. Trouver la meilleure position pour chaque particule. Fin. Trouver la meilleure position globale Fin En général le critère d'arrêt peut être un nombre d'itérations fixe ou bien en fonction de la fonction objective (fitness) ou bien lorsque les vitesses des particules tendent vers 0 [38]

III.3.2. Algorithme Génétique

C'est un algorithme de recherche heuristique globale utilisé pour trouver les valeurs optimales des paramètres des systèmes électriques (tels que la puissance, la tension et la fréquence) en simulant les processus de sélection naturelle, de croisement génétique et de mutation. Il se distingue par sa capacité à gérer de vastes espaces de recherche contenant de multiples contraintes physiques, en convertissant les solutions du problème en « chromosomes » numériques soumis à une évolution à travers des générations successives afin de minimiser l'erreur ou de réduire les coûts économiques." [39]

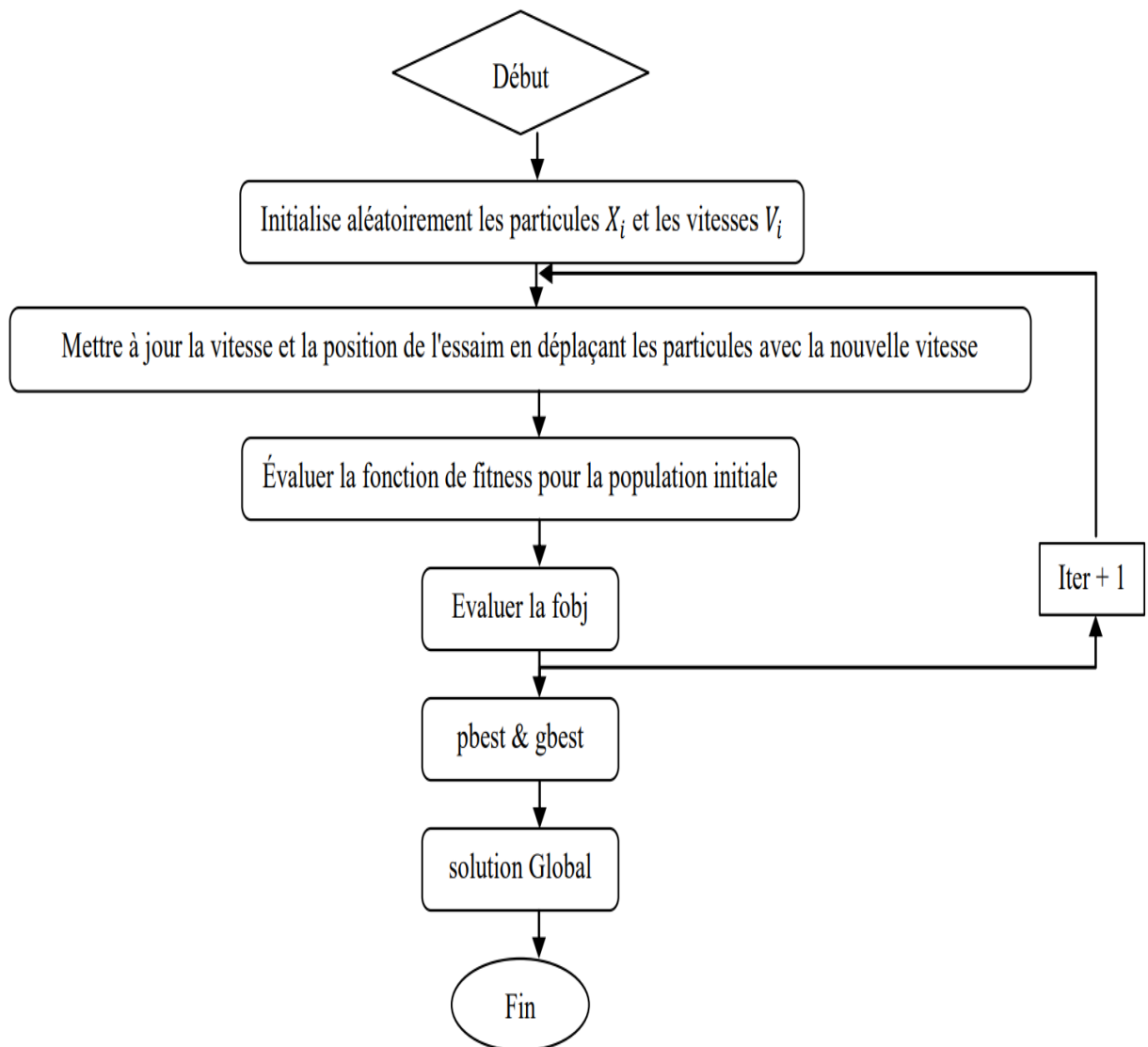


Figure III.3. Organigramme GA

$$X = i=1 \sum m [I_{iexp} - I(V_i, \theta)]^2$$

III.3

III.3.3. CONFIGURATION DES PARAMÈTRES

III.3.4. Nombre de particules

Le nombre de particules utilisé pour la résolution du problème dépend essentiellement de deux facteurs, la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre. En général le choix se fait aléatoirement

III.3.5. Taille et topologie de voisinage

La topologie du voisinage constitue la structure du réseau social et définit avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées

- a. **Topologie en étoile** : chaque particule est reliée à toutes les autres, l'optimum du voisinage est l'optimum global
- b. **Topologie en anneau** : chaque particule est reliée à n particules ($n = 3$ en général), c'est la plus utilisée.
- c. **Topologie en rayon** : les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale.

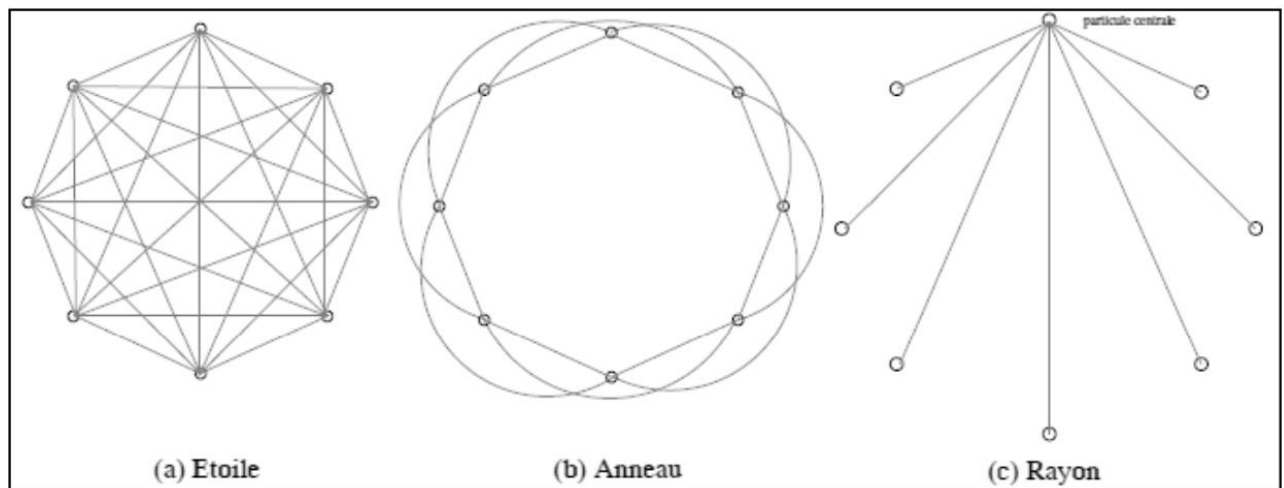


Figure III.4. Topologies de voisinage

III.4. Amélioration des algorithmes PSO

Malgré la simplicité et la facilité de l'utilisation de l'algorithme PSO il présente un risque de divergence ou de convergence rapide qui permet de stagner dans un optimum local, de ce fait plusieurs améliorations ont été apportées à l'algorithme de base.

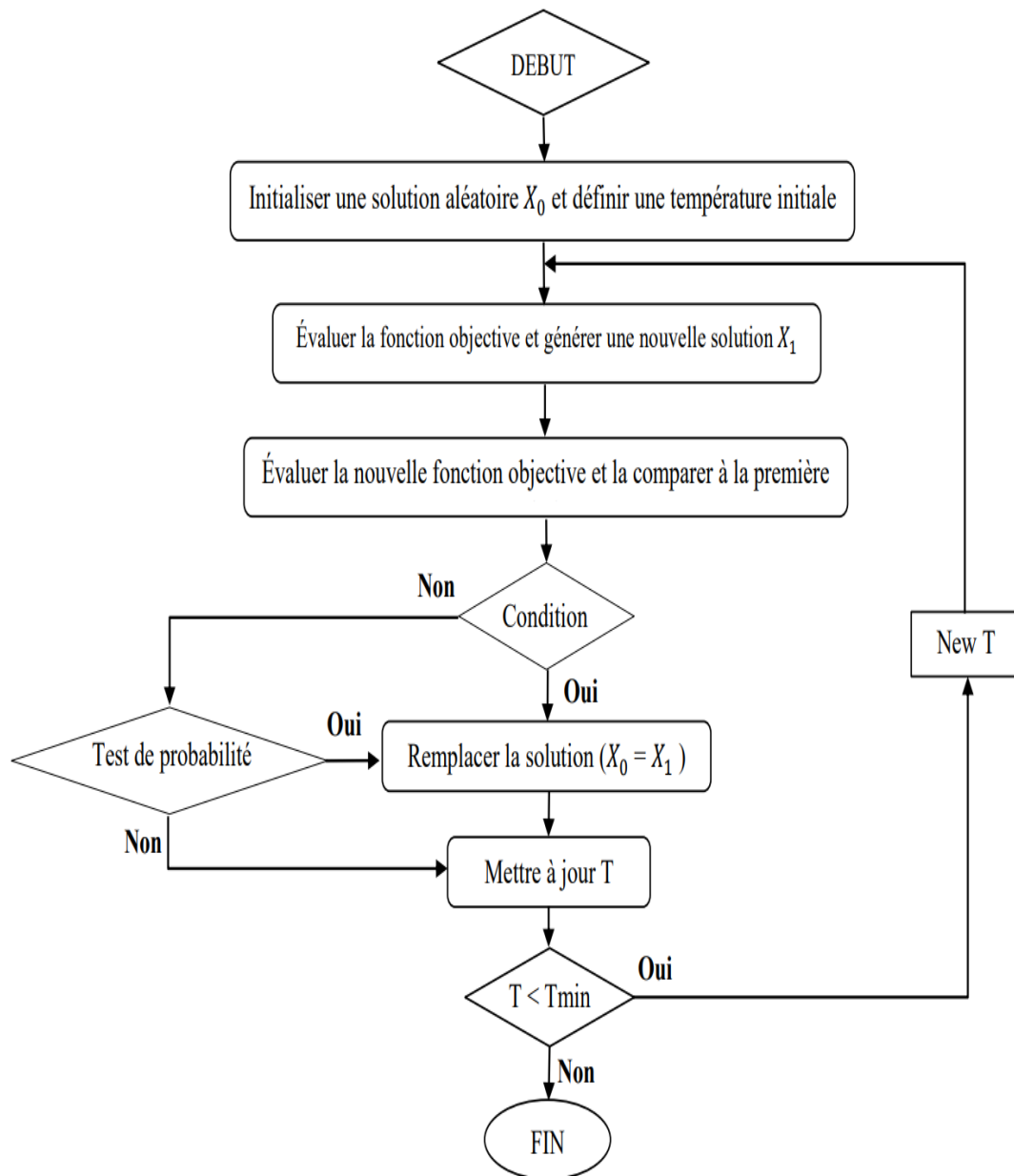


Figure III.5. Schéma illustrant la modélisation de la théorie de l'essaim de particules (PSO)

III.5. Confinement des particules

Pour éviter que le déplacement des particules soit trop rapide, ce qui conduit à sortir de l'espace de recherche, nous pouvons introduire un nouveau paramètre V_{max} , qui permet de limiter la vitesse sur chaque dimension et ainsi de contrôler les particules. Notons que cela ne restreint pas les valeurs de x_i à l'intervalle $[V_{i \min}, V_{i \max}]$, mais limite seulement la distance maximale qu'une particule va parcourir au cours d'une itération. Cette méthode permet de contrôler la divergence de l'algorithme et de réaliser ainsi un compromis efficace entre intensification et diversification. De plus, une stratégie de confinement des particules peut être introduite. Une telle stratégie permet de ramener une particule sortie de

l'espace de recherche à l'intérieur de celui-ci. Dans ce cadre, plusieurs méthodes peuvent être employées :

- La particule est laissée à l'extérieur de l'espace de recherche, mais on n'évalue pas sa fonction objective. Ainsi, elle ne pourra pas attirer les autres particules en dehors de l'espace de recherche.
- La particule est arrêtée à la frontière et les composantes associées à sa vitesse sont annulées.
- La particule rebondit sur la frontière, elle est stoppée à la frontière mais les composantes correspondantes de la vitesse sont multipliées par un coefficient tiré aléatoirement dans l'intervalle $[-1,0]$

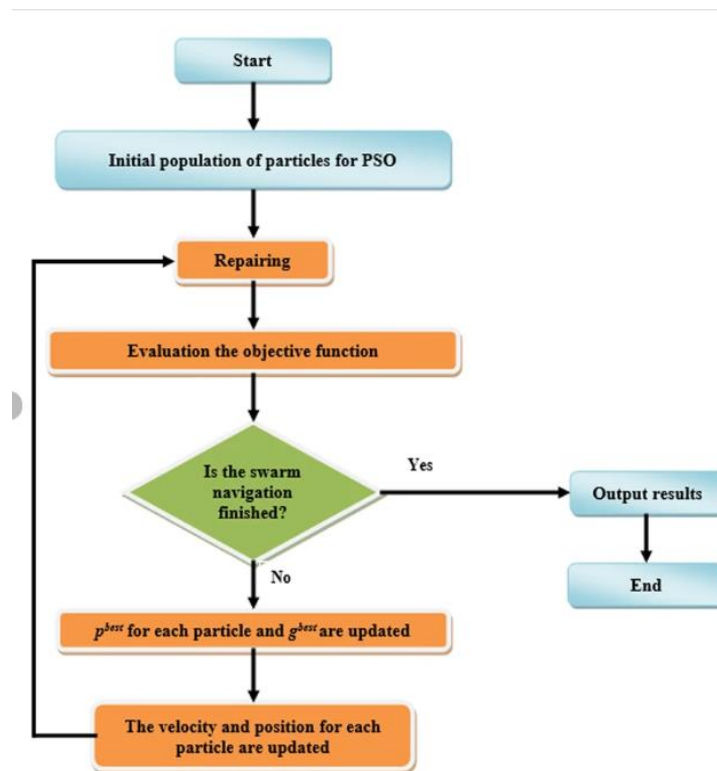


Figure III.6. Schéma illustrant l'architecture de l'optimisation par essaim de particules (PSO).

III.6. Coefficient de constriction

L'étude de la dynamique des particules au sein de l'essaim a conduit à la recherche de solutions pour éviter la divergence de l'algorithme, comme par exemple l'introduction du paramètre V_{max} que nous avons vu dans le paragraphe précédent et qui permet de limiter la divergence des particules. De nombreuses études ont été menées sur la dynamique des particules concernant l'analyse des conditions de convergence de l'essaim.

La combinaison des paramètres ω , c_1 et c_2 permet de régler l'équilibre entre les phases de diversification et d'intensification du processus de recherche. L'utilisation d'un coefficient de constriction χ (ou facteur de constriction) permet de mieux contrôler la divergence de l'essaim et de s'affranchir de la définition de $V_{\max}$. Cette variante de PSO, qui a été largement utilisée dans la littérature, est connue sous le nom de « Canonical PSO » [40]. En utilisant ce coefficient, l'équation (1) devient :

$$v_i(t+1) = \chi(v_i(t) + \phi_1 r_1 [x_{pi}(t) - x_i(t)] + \phi_2 r_2 [g(t) - x_i(t)]) \quad \text{III.4}$$

$$\chi = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad \text{III.5}$$

III.7. Coefficient d'inertie

Le coefficient d'inertie ω , introduit par Y. Shi et Eberhart [41], contrôle l'influence de la direction de la particule sur le déplacement futur. Le but de l'introduction de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration). L'intensité de l'exploration de l'espace de recherche dépend de la valeur du poids d'inertie, une grande valeur de ω facilite l'exploration globale, alors qu'une petite valeur facilite l'exploration locale. Du fait de son influence sur les performances de l'algorithme PSO, le poids d'inertie a suscité un grand intérêt de la part de la communauté des chercheurs. Dans [41], les auteurs ont proposé un coefficient d'inertie dynamique qui varie au cours du temps. Il commence par une valeur proche de 0,9 et descend linéairement pour arriver à 0,4. Cette stratégie a beaucoup amélioré les performances du PSO dans plusieurs problèmes d'optimisation. Le coefficient d'inertie ω varie linéairement avec le temps selon la formule suivante :

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{iter}{iter_{\max}} \quad \text{III. 6}$$

$iter$ est l'itération courante et $iter_{\max}$ est le nombre maximal d'itérations. Les coefficients $\omega_{\max}$ et $\omega_{\min}$ désignent respectivement les valeurs maximum et minimum du coefficient. Dans une autre variante Y. Shi et Eberhart ont proposé une valeur du coefficient d'inertie choisie au hasard selon une distribution uniforme telle que $[0.5; 1]$ [42]

L'exécution de l'algorithme PSO se termine lorsque l'un des critères d'arrêt suivants est satisfait : Nombre maximal d'itérations atteint : L'algorithme s'arrête après un nombre prédéfini d'itérations ($It_{\max}$). Convergence de l'essaim : La variation de la meilleure solution globale (G_{best}) entre plusieurs itérations successives devient inférieure à une tolérance d'erreur fixée (epsilon).

III.8. Stratégie Fully Informed Particle Swarm (FIPS)

La version canonique de la PSO implique que les mises à jour de la vitesse sont effectuées en considérant uniquement la position de la meilleure particule du voisinage et la meilleure position propre d'une particule. Cependant, il a été suggéré que la prise en compte des positions des autres particules du voisinage pourrait bénéficier au processus de recherche mené par l'essaim dans son ensemble [43]. C'est l'idée derrière la variante FIPS de la PSO, dans laquelle la meilleure position de tous les voisins de la particule est prise en compte pour la mise à jour de la vitesse [43]. Les équations de la FIPS peuvent être obtenues à partir de la formulation par coefficient de constriction de type 1' de la PSO en notant d'abord que (2) est équivalent à:

$$v_{i,d} \leftarrow X[v_{i,d} + \phi \cdot (p_{i,d} - x_{i,d})] \quad \text{III.7}$$

$$\text{for } \phi = \phi_1 + \phi_2 \text{ and}$$

$$(4a) p_{\{i,d\}} = \frac{\phi_1 p_{\{i,d\}} + \phi_2 p_{\{g,d\}}}{\phi}$$

$$(4b) \phi_1 = U(0, \phi_{\{1, \max\}})$$

$$(4c) \phi_2 = U(0, \phi_{\{2, \max\}})$$

$$(4d) \phi = \phi_1 + \phi_2$$

La formulation FIPS est obtenue en modifiant le partitionnement dans (4a) (4d) pour obtenir :

$$(5a) v_{\{i,d\}} \leftarrow X[v_{\{i,d\}} + \sum_{\{k \in N_i\}} \frac{\phi_{-k} \cdot (p_{-k,d} - x_{\{i,d\}})}{|N_i|}]$$

$$(5b) \phi = \sum_{\sum_{-k \in N_i}} \phi_{-k}$$

$$(5c) \phi_{-k} = U(0, \phi_{\max})$$

$p_{\{k,d\}}$ est la meilleure position trouvée par le k -ième voisin de la particule à mettre à jour, et W_k est un facteur de pondération qui est une valeur constante ou une fonction d'une caractéristique pertinente de la k -ième particule, telle que son adaptation (*fitness*) ou sa distance euclidienne par rapport à la particule en cours de mise à jour. Topologie de l'essaim

III.9. Algorithme TRIBES

TRIBES est un algorithme OEP créé par M. Clerc dans [44]. Cet algorithme permet d'avoir un paramétrage automatique de l'OEP, l'utilisateur doit seulement définir la fonction objective et le critère d'arrêt. Cependant, il est à signaler que TRIBES ne peut pas résoudre tous les problèmes

avec exactitude. De plus, ses résultats sont probabilistes à cause de son caractère stochastique. Le but de TRIBES, d'après son auteur, est d'être efficace dans la plupart des cas et de permettre à ses utilisateurs de gagner du temps, en évitant l'étape de réglage de la métaheuristique. La thèse de Yann Cooren [45] s'attache particulièrement à l'algorithme TRIBES. Il le décrit comme un algorithme d'OEP mono-objectif sans aucun paramètre de contrôle. Cet algorithme fonctionne comme une boîte noire, pour laquelle l'utilisateur n'a qu'à définir le problème à traiter et le critère d'arrêt de l'algorithme. Dans TRIBES, l'essaim particulaire est divisé en plusieurs sous-essaims appelés tribus. Les tribus sont de tailles différentes, qui évoluent au cours du temps. Le but est d'explorer simultanément plusieurs régions de l'espace de recherche, généralement des optima locaux, avant de prendre une décision globale. Dans le but de prendre une telle décision, les tribus échangent leurs résultats tout au long du traitement. Deux types de communications sont donc à définir : la communication intra-tribu et la communication inter-tribu. Chaque tribu étant composée d'un nombre variable de particules

TRIBES est un algorithme compétitif qui permet de trouver rapidement des optima locaux (très utile pour l'optimisation dynamique). Cependant les particules ont tendance à rester dans ces optima locaux et ont du mal à en sortir.

III.10. Optimisation par essaim de particules à convergence rapide

L'optimisation par essaim de particules rapide (FCPSO : fast convergence particle swarm optimisation en anglais) est basée sur l'équilibre entre la diversité du lieu de la particule individuelle en introduisant un nouveau paramètre qui est la dimension particulaire moyenne (PMD) de toutes les particules qui peut améliorer les performances du PSO

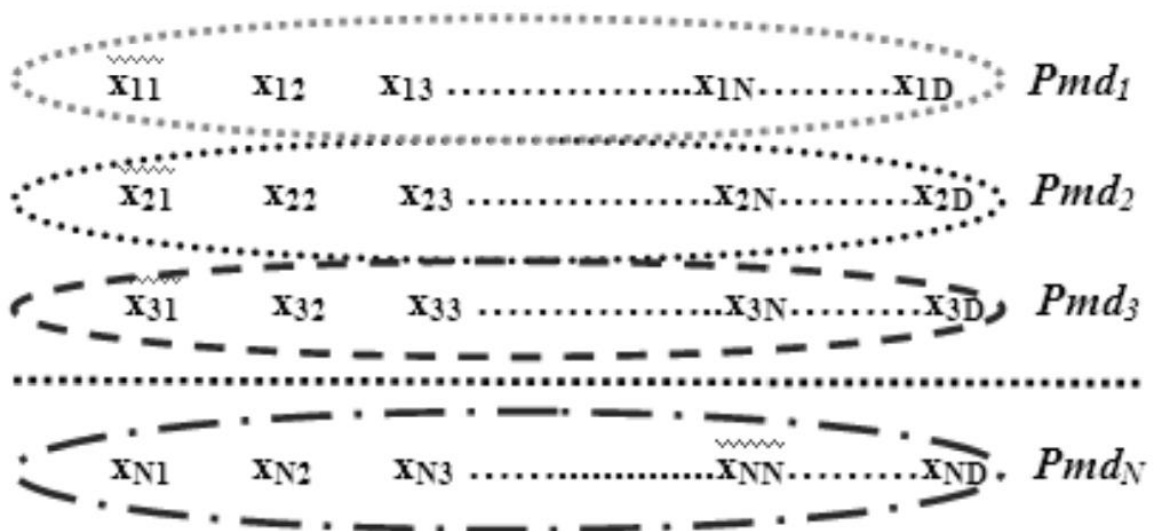


Figure III.7. Calcul de la dimension particulaire moyenne pour N particules

Après les mises à jour de l'essaim de particules, à partir de la génération de t à $t + 1$ en dehors de la suite de la x_{pi} et g , la particule pourrait suivre qui choisir parmi l'essaim de particules. Le troisième paramètre PMD_i de particules i_{eme} et l'équation de vitesse sont générés par les équations suivantes:

$$PMD_i = \frac{Dx_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iD}}{D} \quad \text{III.8}$$

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [x_{pi}(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [g(t) - x_i(t)] + c_3 r_3 [PMD_i(t) - x_i(t)] \quad \text{III.9}$$

Où c_3 est un coefficient constant fixé par l'utilisateur tel que : $c_1 + c_2 + c_3 \geq 4$. r_3 est un nombre aléatoire dans la plage $[0 \ 1]$ tiré à chaque itération. Après l'implantation du PMD_i à la formule de vitesse, x_{pi} , g et PMD_i fournissent des informations à la prochaine génération et augmentent ainsi la quantité d'informations. Par conséquent, il est possible de trouver la solution optimum rapidement.

La position de g est utilisée pour améliorer le taux de convergence, mais réduit la diversité de la population qui mène à un optimum local. Dans le même temps le nouveau paramètre ajouté PMD_i peut déplacer les particules à un meilleur emplacement et affaiblir l'attraction de g vers les optimums locaux. [46]

III.11. Les étapes de la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules

L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

- **1^{ère} étape** : Initialisation des coefficients c_1 et c_2 , le coefficient d'inertie ω .
- **2^{ème} étape** : La création de la population initiale aléatoirement et le calcul de la fitness
- **3^{ème} étape** : Le calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules.
- **4^{ème} étape** : Le calcul de la meilleure fitness de la population initiale et comparer par la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations
- **5^{ème} étape** : incrémentation du nombre d'itération $t = t+1$.
- **6^{ème} étape** : Si un critère d'arrêt est satisfait alors passer à la 7^{ème} étape. Autrement, aller à la 3^{ème} étape.
- **7^{ème} étape** : La position enregistrée dans la solution optimale

III.12. Algorithme de PSO avec Coefficients d'Accélération variable PSO-TVAC

Dans ce cas, les coefficients cognitif et social $C1$ et $C2$ 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. C'est réalisé en changeant 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'équation suivante :

$$C1 = (C1f - C1i) \frac{iter}{itermax} + C1i \quad \text{III.10}$$

$$C2 = (C2f - C2i) \frac{iter}{itermax} + C2i$$

Donc $C1i$, $C1f$, $C2i$ et $C2f$ sont des valeurs de social accélération initiale et finale, et $C1i$ et $C2i$ sont des valeurs de social accélération initiale et finale. Généralement des valeurs utilisées : 2.5 pour $C1i$ et $C2f$, 0.5 pour $C1f$ et $C2i$.

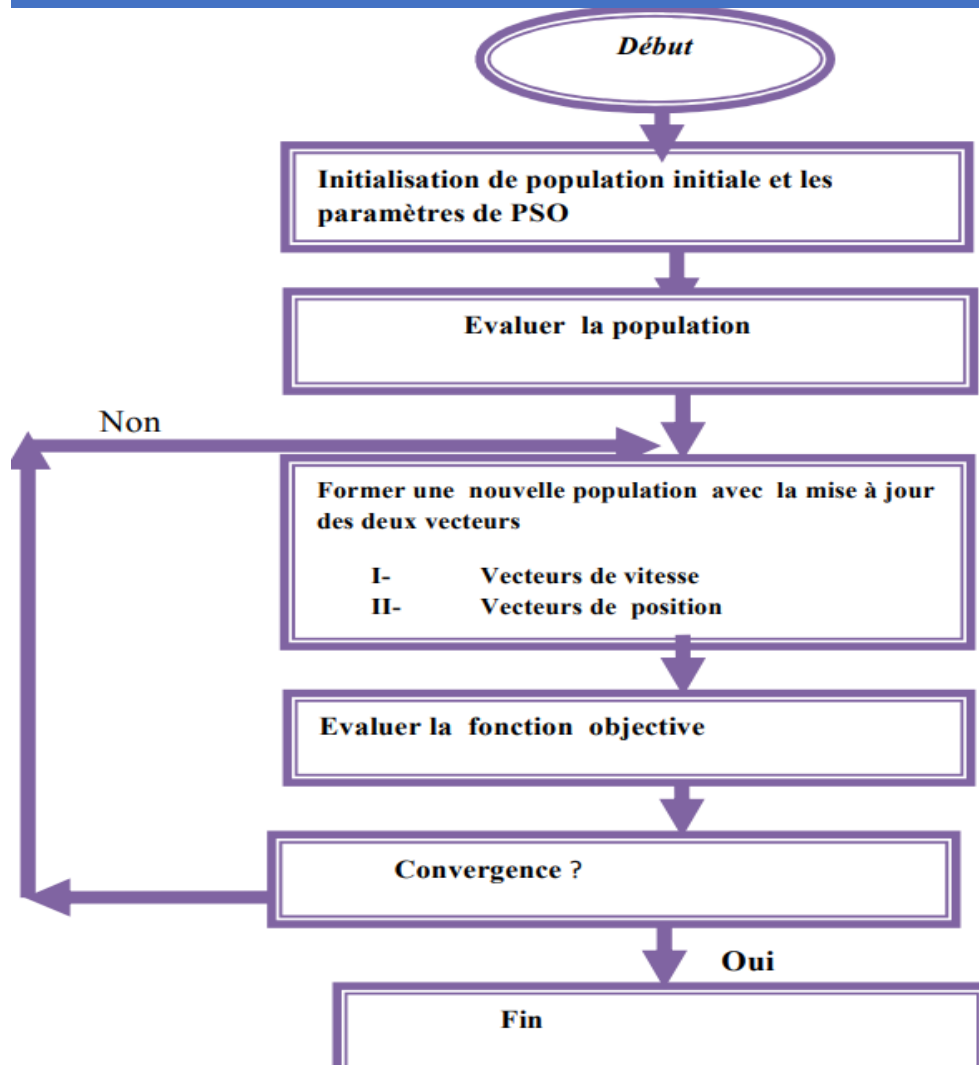


Figure III.8. Organigramme de l'algorithme PSO

III.14. Les Caractéristiques principales

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour des nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- Il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué.
- Il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution). Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances : suivre sa vitesse propre, revenir vers sa meilleure performance, aller vers la meilleure performance de ses informatrices. Signalons, de plus, qu'il existe des versions adaptatives qui évitent même à l'utilisateur la peine de définir les paramètres (taille de l'essaim, taille des groupes d'informatrices, coefficients de confiance)

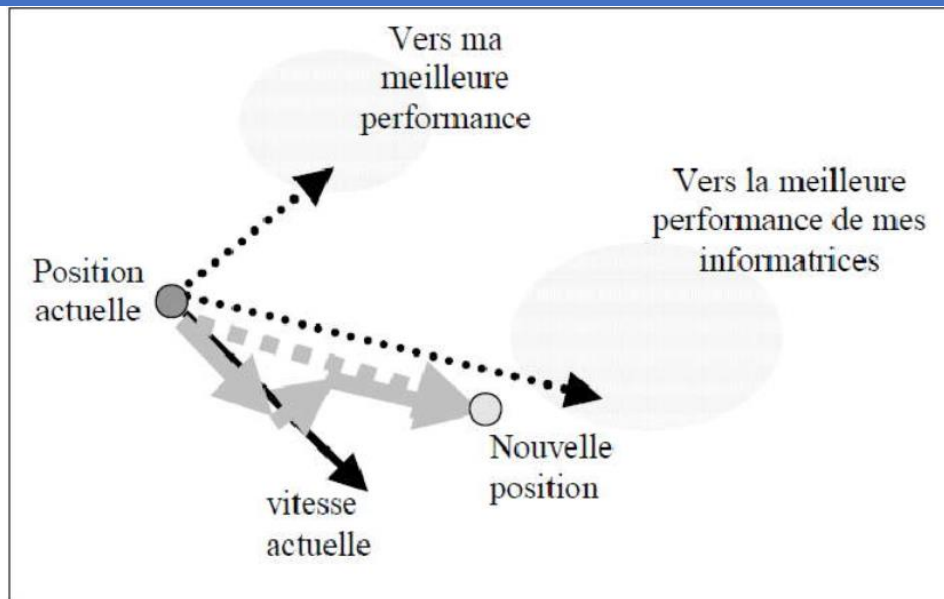


Figure III.9. Schéma de principe du déplacement d'une particule

Conclusion

En somme, cette étude théorique nous a permis de cerner les fondements et les évolutions majeures de l'Optimisation par Essaim de Particules. À travers l'examen des variantes FIPS, TRIBES et FCPSO, il apparaît clairement que la performance de ces métaheuristiques repose sur une gestion fine de l'interaction entre les particules et une adaptation dynamique des structures de recherche

Que ce soit par l'intégration de l'intelligence collective globale dans FIPS, l'autonomie structurelle de TRIBES, ou le contrôle de la diversité via le paramètre PMD dans FCPSO, l'objectif demeure la résolution efficace de problèmes complexes tout en minimisant l'intervention humaine dans le réglage des paramètres.

Toutefois, la compréhension théorique de ces mécanismes ne saurait être complète sans une confrontation aux réalités numériques. C'est dans cette optique que s'inscrit le chapitre suivant, où nous passerons de la théorie à la pratique. Nous y aborderons la mise en œuvre algorithmique et la validation de ces stratégies à travers une série de simulations informatiques sous l'environnement MATLAB, afin d'évaluer concrètement leurs performances et leur robustesse.

Chapitre IV :

Simulation sous

MATLAB/Simulink

Introduction

Après avoir abordé, dans les chapitres précédents, les principaux composants de la ferme hybride et présenté leurs définitions et concepts scientifiques essentiels, nous consacrons ce chapitre à l'étude du schéma complet du système. Cette étude est réalisée par une simulation sur le logiciel MATLAB, via l'environnement Simulink, en intégrant les différents composants nécessaires à ce système. De plus, nous aborderons la théorie de l'optimisation par essaim de particules (PSO), qui constitue la base de notre travail de régulation et d'optimisation. Enfin, nous présenterons et analyserons les différents résultats et courbes qui illustrent clairement le fonctionnement du système, ainsi que les étapes clés par lesquelles nous sommes passés pour réaliser ce travail

IV.1. La méthode d'optimisation par essaim de particules (Pso)

Ce quatrième chapitre est consacré à l'étude par simulation d'un système de pompage photovoltaïque autonome et éco-responsable, intégrant un stockage électrochimique par batteries afin d'exclure définitivement l'usage des énergies fossiles. La stratégie de gestion énergétique développée repose sur l'équilibrage continu entre la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque et la puissance requise par la motopompe, en exploitant l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Cet algorithme métaheuristique, inspiré du comportement social des bancs d'oiseaux et de poissons, est implémenté pour contrôler le hacheur Boost et assurer le suivi du point de puissance maximale (MPPT) avec une haute précision dynamique. En mode d'excès énergétique ($\Delta P > 0$), le surplus de production est orienté vers la charge des batteries tant que leur état de charge n'atteint pas le seuil maximal (SOC_{max}), au-delà duquel la production est bridée pour des raisons de sécurité. Inversement, lors d'un déficit énergétique ($\Delta P < 0$) dû à l'absence de rayonnement solaire, le superviseur bascule instantanément sur le déstockage de l'énergie pour compenser le manque, assurant ainsi la continuité de l'alimentation électrique et garantissant le fonctionnement ininterrompu du système, ce qui permet d'atteindre un équilibre dynamique sûr et durable du processus de pompage.

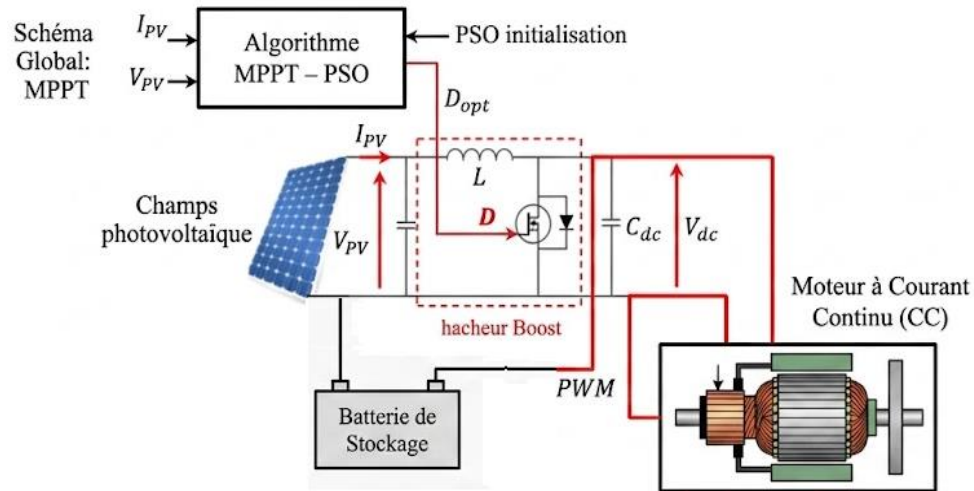


Figure IV.1. Schéma synoptique global du système de pompage photovoltaïque optimisé par MPPT-PSO.

IV.2. Partie pratique (simulation de Matlab)

En outre, la Figure IV.2. illustre le modèle de simulation global implémenté sous l'environnement MATLAB/Simulink pour valider les performances de cette approche. Ce schéma structurel met en évidence l'interconnexion dynamique entre le générateur photovoltaïque, optimisé en temps réel par l'algorithme PSO via le hacheur Boost, et le banc de batteries géré par son convertisseur bidirectionnel. Au cœur de cette configuration, le bloc de supervision (EMS - Energy Management System) exécute l'algorithme de gestion pour orchestrer les flux de puissance, garantissant ainsi une alimentation stable et ininterrompue de la motopompe quelles que soient les fluctuations du rayonnement solaire.

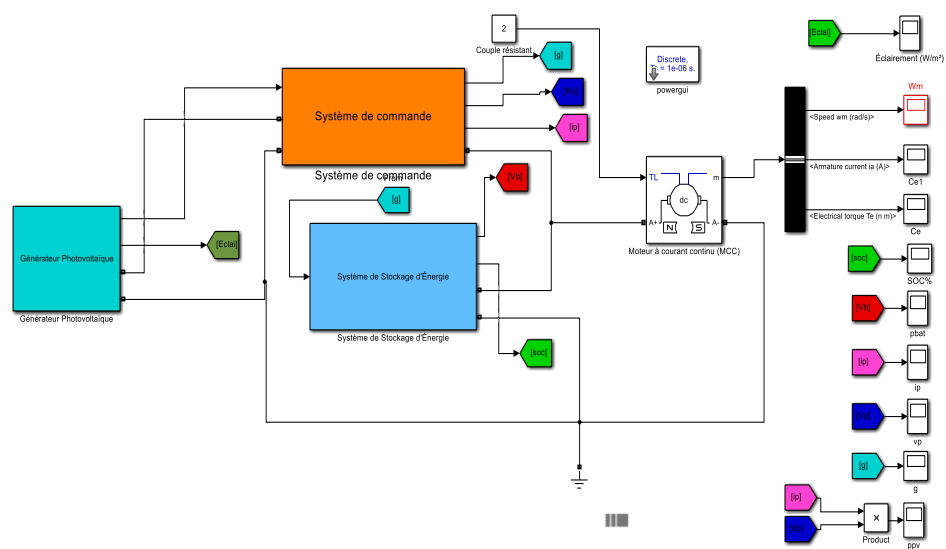


Figure IV.2. Schéma global de simulation du système de pompage photovoltaïque sous Simulink

IV.2.1. Bloc Générateur Photovoltaïque (GPV)

De manière générale, ces courbes illustrent la réponse du système hybride face à des variations climatiques soudaines et progressives sur une durée de simulation de 5 secondes. Elles permettent de valider l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique : Impact de l'éclairement (variations brusques) : Ce profil teste la réactivité du système face à des chutes et des hausses soudaines de la lumière (simulant le passage de nuages). L'objectif est de vérifier l'aptitude de l'algorithme PSO à poursuivre le point de puissance maximale sans interruption de l'alimentation de la pompe. Impact de la température (variation progressive) : Ce profil reproduit l'échauffement et le refroidissement graduels des panneaux au cours de la journée, afin d'analyser l'influence de la chaleur sur le rendement global, sachant que l'élévation de température diminue naturellement la tension des cellules. En conclusion : Ce graphique représente un "test de robustesse" global. Il combine des perturbations climatiques rapides (éclairement) et lentes (température) pour prouver que le système de contrôle réussit à maintenir l'équilibre énergétique, à protéger les batteries et à garantir le fonctionnement continu du pompage, quelles que soient les conditions météorologiques

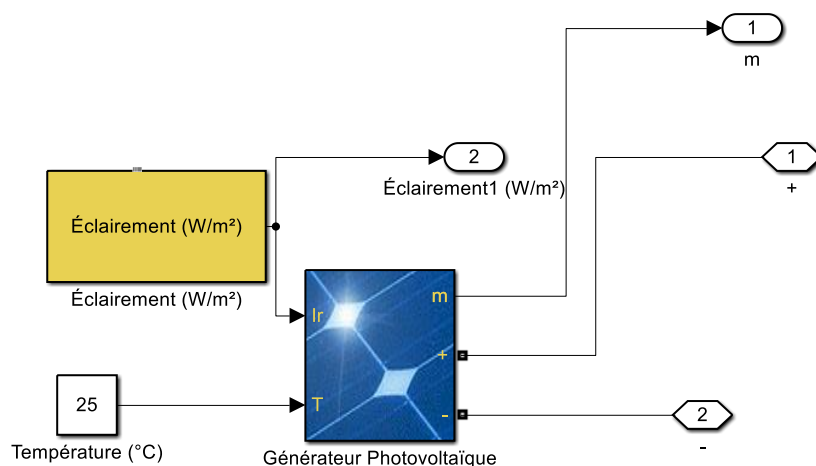


Figure IV.3. Schéma de simulation du bloc générateur photovoltaïque (GPV)

IV.2.2. Schéma de commande

Mécanisme de contrôle des convertisseurs par l'algorithme PSO. Dans cette configuration, le contrôle de l'hacheur élévateur (Hacheur Boost) est directement assuré par l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) intégré dans le schéma, où le mécanisme de fonctionnement global et ses composants s'articulent comme suit : Génération du rapport cyclique (D) : L'algorithme PSO acquiert en temps réel les données de tension et de courant issues du générateur photovoltaïque. En appliquant ses équations cinétiques de déplacement, il calcule de manière itérative le rapport cyclique optimal (D) requis pour ajuster le point de fonctionnement du système, en transmettant ce signal directement à la grille de commande du convertisseur (PWM). Régulation dynamique lors des

perturbations climatiques : À l'instant $t = 0.5s$, lors de la baisse soudaine des conditions d'ensoleillement, la position du point de puissance maximale se déplace instantanément. L'algorithme PSO réagit immédiatement en modifiant le rapport cyclique, forçant ainsi le hacheur Boost à stabiliser la puissance générée sur des paliers successifs et constants qui coïncident parfaitement avec le potentiel théorique disponible. Interface du système de stockage et stabilisation : Parallèlement à l'action sur le hacheur Boost, le système de gestion supervise le convertisseur bidirectionnel associé aux batteries. Ce composant adapte son mode de fonctionnement pour absorber le surplus d'énergie sous forme de charge, ou pour restituer l'énergie stockée lors des chutes de production, maintenant ainsi la stabilité de la tension du bus continu (V_{dc}) qui alimente l'unité de pompage

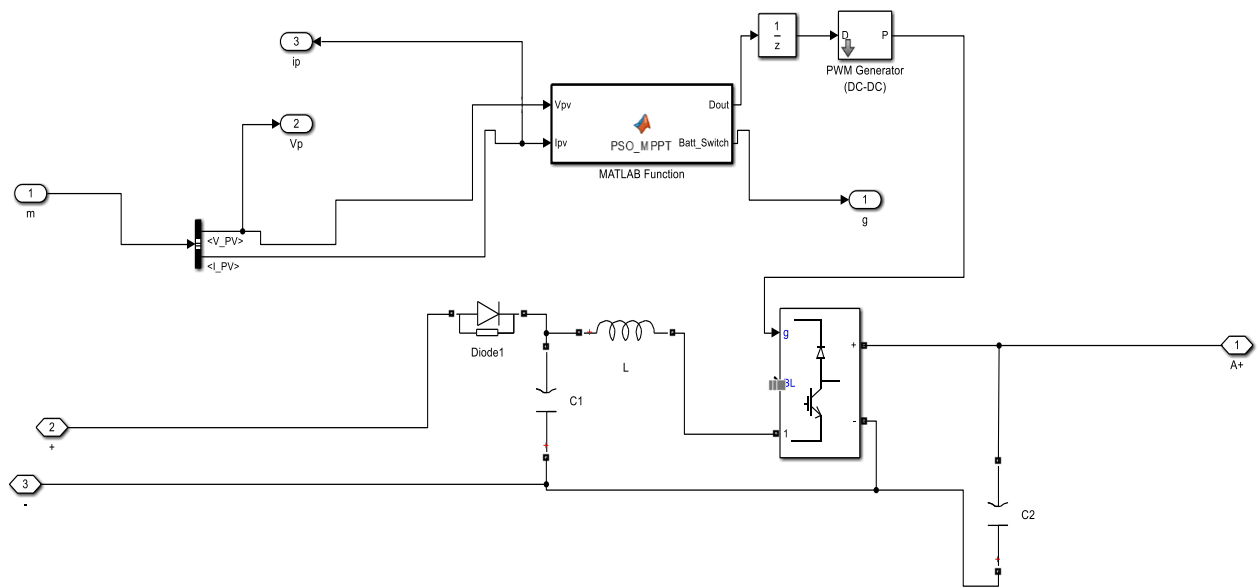


Figure IV.4. Schéma de simulation du hacheur Boost avec commande MPPT-PSO

IV.2.3. Le système de stockage d'énergie

Structure et mécanisme de contrôle du système de stockage par batterie. Dans ce bloc de simulation, le système intègre un banc de stockage basé sur la technologie des batteries au Lithium-ion, géré dynamiquement par un circuit de commutation automatique pour orienter les flux de puissance selon deux trajectoires distinctes : Le trajet de charge (Mode Absorption) : Lorsque le système de gestion détecte un excès d'énergie photovoltaïque, le signal de commande (g) active le commutateur (Switch). Le courant est alors dirigé depuis le bus continu à travers la branche supérieure contenant la diode de blocage (bus charge) pour alimenter la borne positive (+) de la batterie, permettant ainsi de stocker le surplus d'énergie et d'élever l'état de charge (SOC). Le trajet de décharge (Mode Restitution) : En cas de déficit énergétique ou d'absence de rayonnement solaire, le commutateur (Switch) modifie instantanément sa position sous l'action du superviseur. La batterie au Lithium-ion bascule alors en mode générateur, libérant l'énergie stockée directement vers les

bornes de sortie (1 et 2) pour alimenter le bus continu, ce qui garantit la continuité de l'alimentation électrique de la motopompe.

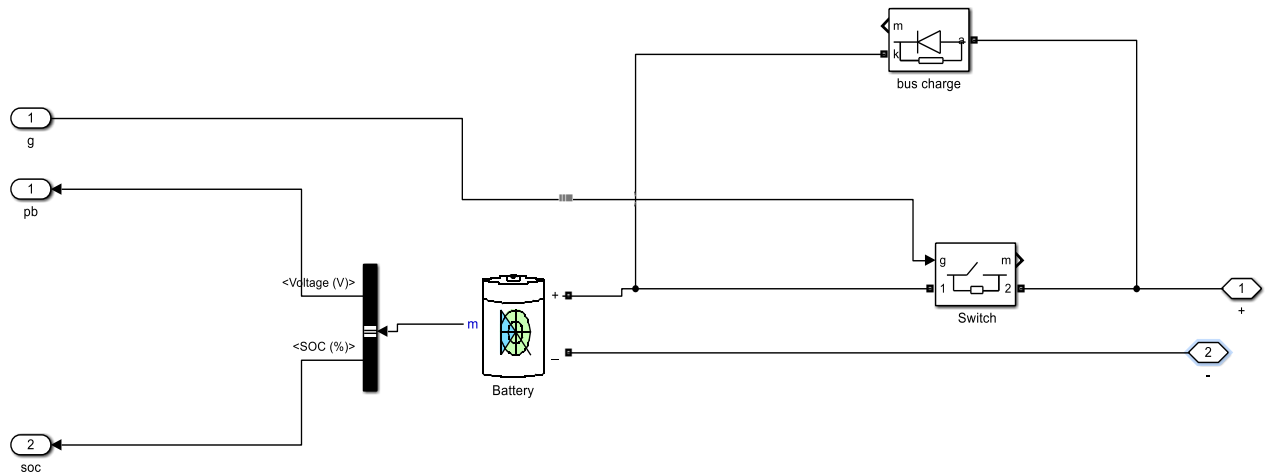


Figure IV.5. Schéma de simulation du bloc batterie et son circuit de commutation

IV.3. Résulta

Après avoir effectué la simulation sur le système étudié, nous avons obtenu les résultats suivants

IV.3.1. Bloc Générateur Photovoltaïque

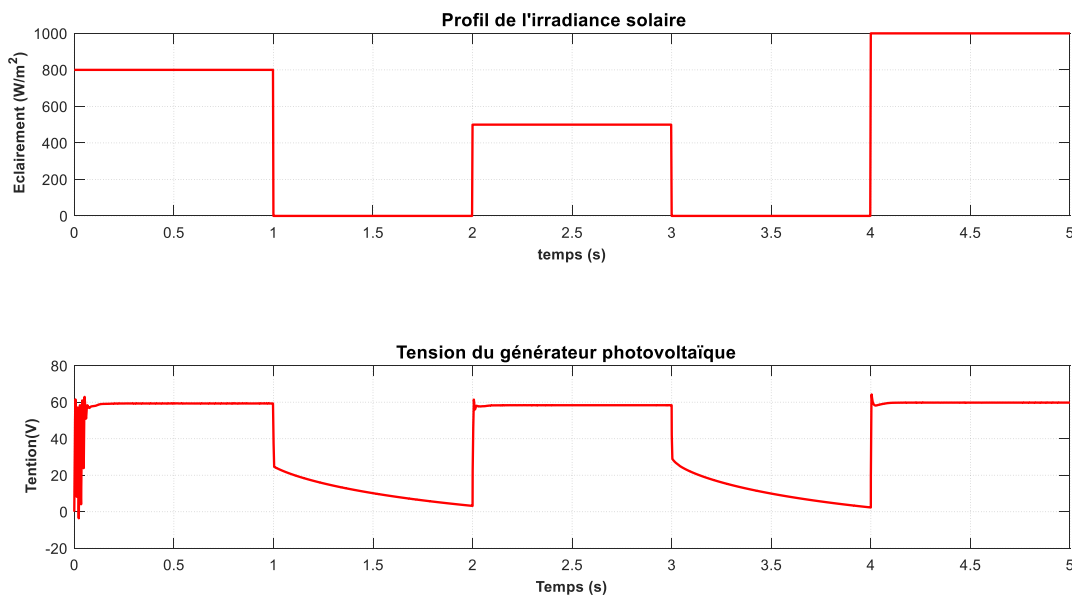


Figure IV.6. D'évolution de la tension du générateur photovoltaïque sous un profil d'éclairement variable.

Les résultats de simulation mettent en évidence l'impact direct des variations échelonnées de l'éclairement solaire sur la réponse dynamique de la tension des panneaux sous le contrôle de

l'algorithme PSO. Durant les phases d'ombrage total (intervalles [1s - 2]et [3s - 4s] où l'éclairement chute à 0 W/m²), l'algorithme déconnecte intelligemment les panneaux pour basculer sur la batterie ; les chutes abruptes suivies d'une décroissance exponentielle de la tension traduisent alors la décharge transitoire des capacités internes du système. Inversement, lors des périodes d'ensoleillement (800 ,500 et 1000 W/m²), la reconnexion des panneaux se manifeste par une remontée verticale et immédiate de la tension aux secondes 2 et 4. L'algorithme PSO démontre ici sa haute performance en convergeant rapidement pour poursuivre et stabiliser la tension autour de sa valeur optimale (58V), garantissant ainsi un suivi efficace du point de puissance maximale (MPPT) malgré les transitions brusques.

IV.3.2. Bloc Batterie

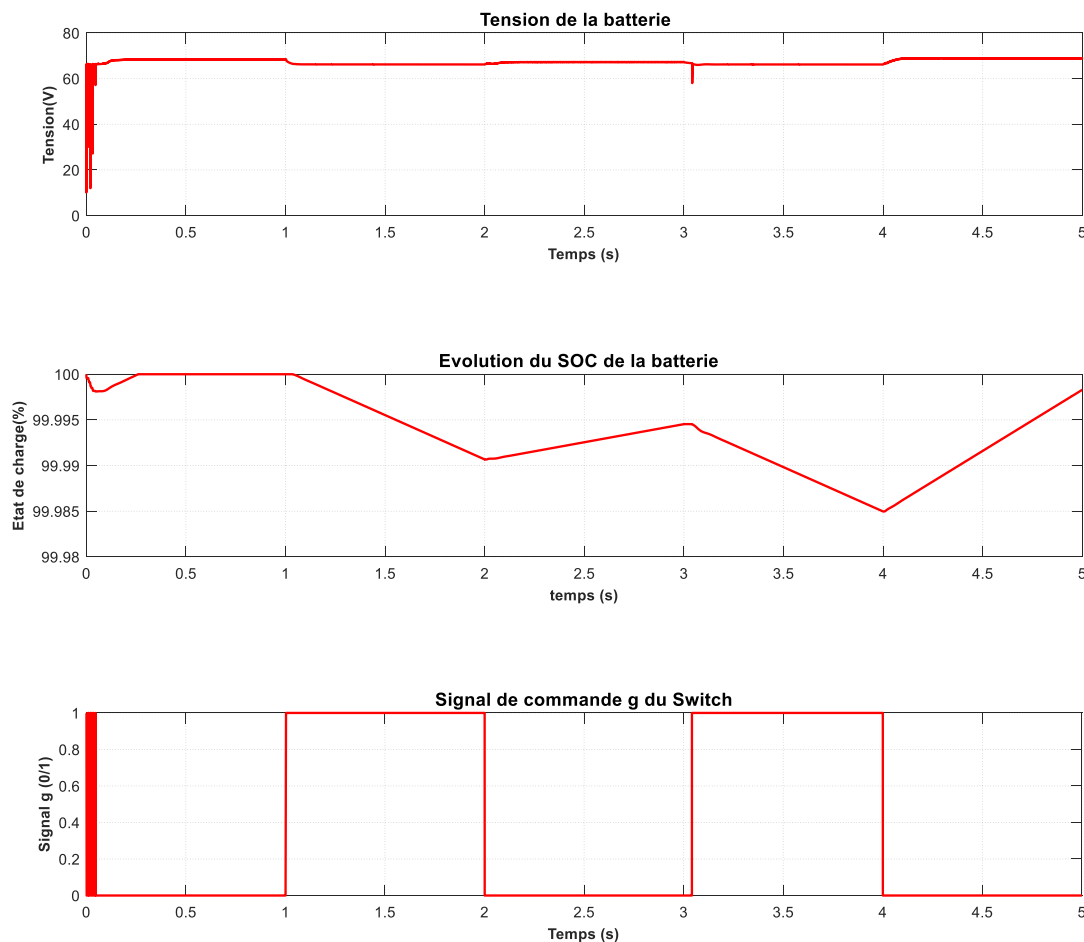


Figure IV.7. Courbe de comportement de la batterie et du signal de commande du switch en fonction du temps.

Les résultats de gestion énergétique par l'algorithme PSO montrent une parfaite corrélation entre l'état de la batterie et son signal de commande (Sbat) face aux variations d'éclairement. Lors des phases d'ombrage (intervalles [1 - 2s] et [3s - 4s]), l'algorithme bascule instantanément le signal Sbat à l'état logique haut (1), ordonnant la fermeture de l'interrupteur ; ce mode décharge se traduit

physiquement par une baisse de la tension à 59 V et une pente décroissante du SoC pour compenser le déficit photovoltaïque. Inversement, en période d'ensoleillement, Sbat revient à l'état logique bas (0), permettant à la tension de remonter à 64 V et au SoC d'amorcer une trajectoire ascendante jusqu'à sa valeur maximale (100%). Cette dynamique de commutation intelligente valide l'efficacité de la stratégie pour optimiser le stockage tout en garantissant la continuité absolue de l'alimentation du moteur.

IV.3.3. Bloc moteur

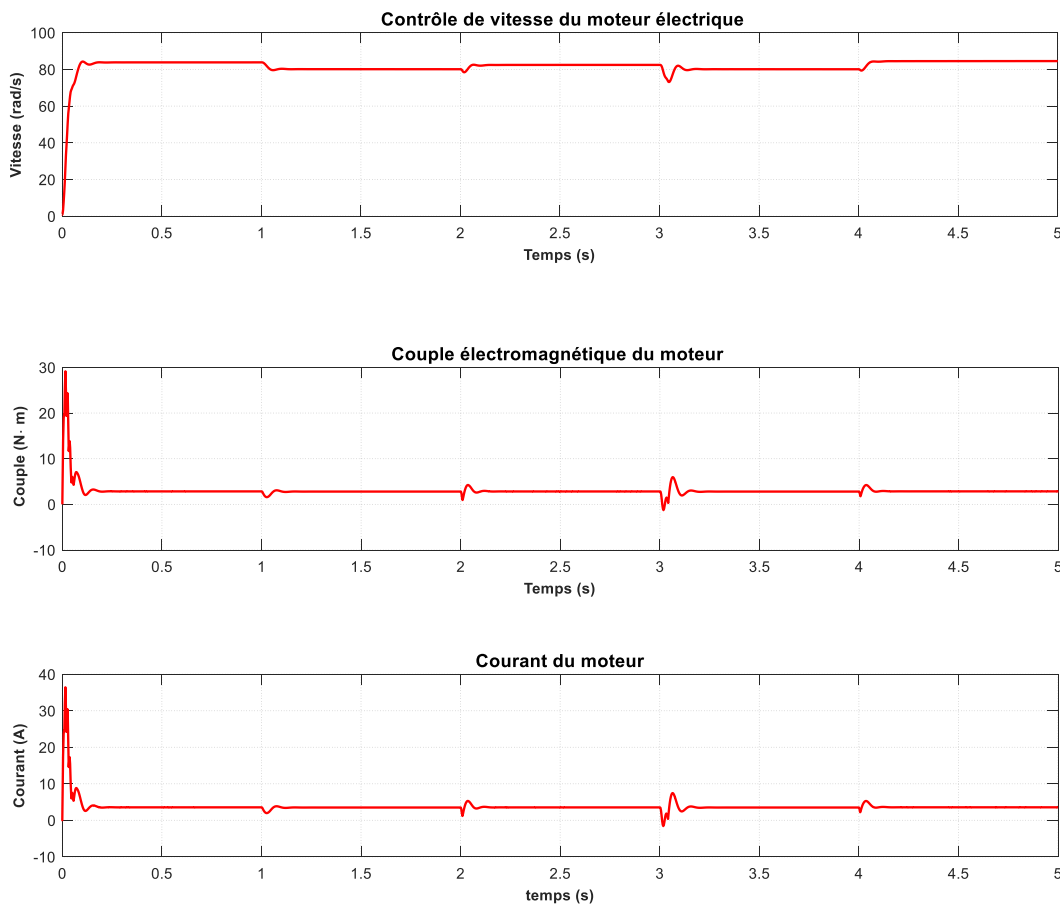


Figure IV.8. Courbe des performances dynamiques du moteur électrique (vitesse, couple et courant) en fonction du temps.

Les résultats de simulation du moteur Figure IV.8. Sous le contrôle de l'algorithme PSO montrent une réponse dynamique rapide et stable. Lors du démarrage, une forte impulsion est enregistrée, marquée par l'atteinte rapide de la vitesse de référence (~ 84 rad/s), coïncidant avec des pics élevés du courant d'induit (35 A) et du couple électromagnétique (~ 27 N.m). En régime permanent, le couple et le courant se stabilisent rapidement à des valeurs constantes (respectivement 2.8 N.m et 3.5 A) en raison de leur proportionnalité directe. Bien que de légères perturbations transitoires apparaissent aux secondes 1, 2, 3 et 4 — dues aux commutations dynamiques entre les

sources (panneaux et batterie) lors des variations d'éclairement —, le système de commande prouve sa haute efficacité à les amortir instantanément (notamment à $t=3s$), garantissant ainsi la continuité de l'alimentation et la stabilité de la vitesse mécanique.

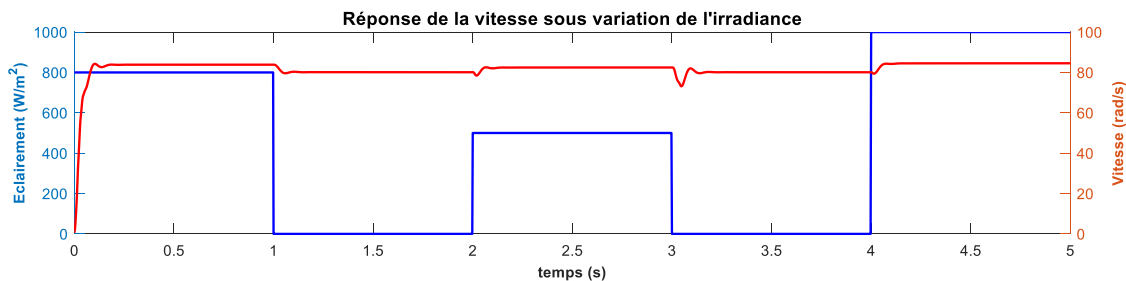


Figure IV.9. Courbe de réponse de la vitesse du moteur sous variation de l'irradiance solaire en fonction du temps.

Le graphe montre l'efficacité de l'algorithme PSO à assurer un contrôle rapide et précis de la vitesse (ligne rouge) face aux variations brusques de l'irradiance (ligne bleue) ; la vitesse se stabilise rapidement avec un dépassement minimal autour de sa valeur de référence (83 - 85rad/s), tout en éliminant efficacement les perturbations transitoires, ce qui prouve la robustesse et la stabilité du système optimisé.

IV.4. Discussion des résultats et durabilité du projet

Tableau IV.1. Comparaison des Systèmes Énergétiques pour une Ferme Isolée du Réseau Électrique

Critère	Sonelgaz Raccordement réseau	Système Solaire Panneaux seuls	Système Hybride Solaire + Batterie + Pompe
Coûts Financiers			
Investissement initial Coût d'installation et raccordement	1 500 000 DA ou plus (lignes + compteur)	610 000 DA (panneaux + onduleur)	700 000 – 800 000 DA (panneaux + batterie + pompe)
Coût opérationnel annuel Factures / entretien	110 000 – 120 000 DA/an	0 DA	≈ 5 000 DA (entretien seul)
Coût total sur 20 ans	2 500 000 DA	610 000 DA	≈ 800 000 DA
Économie vs Sonelgaz	—	1 890 000 DA	≈ 1 700 000 DA
Période de retour sur investissement	Aucun retour	≈ 4 ans et 3 mois	5 – 6 ans
Performance Énergétique			

Critère	Sonelgaz Raccordement réseau	Système Solaire Panneaux seuls	Système Hybride Solaire + Batterie + Pompe
Disponibilité la nuit / par temps nuageux	24h/24 disponible	Indisponible la nuit	Disponible en continu (batterie)
Pompage de l'eau Continu ou intermittent	Continu 24h/24	Diurne uniquement	Continu (pompe DC + batterie)
Autonomie énergétique	0% – dépendant du réseau	70 – 80% (le jour)	100% – totalement autonome
Réserve d'énergie	Réseau national	Aucune réserve	Batterie : 1 – 3 jours
Infrastructure et Installation			
Faisabilité en zone éloignée	Très difficile (plusieurs km de lignes)	Facile partout	Facile et flexible
Durée d'installation	Plusieurs mois à années (démarches + travaux)	Quelques semaines	Quelques semaines
Évolutivité du système	Limitée par le contrat	Extension facile	Très flexible
Durabilité et Environnement			
Émissions de CO ₂	Élevées	Zéro émission	Zéro émission
Impact de la hausse des tarifs	Direct – la facture augmente	Nul – pas de facture	Nul – pas de facture
Durée de vie du système	Illimitée (géré par l'État)	25 – 30 ans	Panneaux : 25 ans Batterie : 8 – 15 ans
Dépendance à un tiers	Totale – Sonelgaz	Nulle	Nulle
Risques et Fiabilité			
Risque de coupure	Élevé – pannes, surcharge	Moyen – nuages / nuit	Très faible
Maintenance du système	À la charge de Sonelgaz	Très simple	Modérée – nettoyage + charge

Conclusion

En conclusion, les résultats de la simulation réalisée sous l'environnement **MATLAB/Simulink** ont démontré l'efficacité de la conception technique proposée pour le système de pompage photovoltaïque autonome face aux défis d'ingénierie majeurs traités. Ces contraintes résidaient principalement dans la fluctuation de la puissance du générateur photovoltaïque et

l'instabilité du point de puissance maximale causées par les perturbations climatiques soudaines et les phases d'ombrage total, ce qui menaçait la continuité de l'alimentation et le fonctionnement de la motopompe. La solution d'ingénierie adoptée a reposé sur l'implémentation de l'algorithme intelligent **MPPT-PSO**, permettant un suivi dynamique précis du point de puissance maximale et la stabilisation de la tension des panneaux à sa valeur optimale ($\sim 58V$) via le contrôle du hacheur Boost. Ce mécanisme fonctionne en parfaite synergie avec le système de gestion énergétique (**EMS**) du banc de batteries au Lithium-ion, qui assure un équilibre de puissance sécurisé en absorbant l'excès de production par la charge ou en compensant le déficit par la décharge , réussissant ainsi à amortir instantanément les perturbations transitoires et à garantir la stabilité de la vitesse mécanique ainsi que la continuité absolue du pompage

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de concevoir et de valider, par simulation numérique sous l'environnement MATLAB/Simulink, une configuration hybride pour le pompage d'eau, associant un générateur photovoltaïque (GPV) et un système de stockage par batteries. L'objectif principal était de répondre aux contraintes d'exploitation rigoureuses dans les zones isolées, notamment en milieu saharien où l'intermittence climatique, les variations brusques de l'ensoleillement et les fortes températures limitent les performances et la stabilité des installations classiques.

Les tests d'évaluation et de simulation menés ont permis d'aboutir à des résultats probants, structurés autour des axes clés suivants :

- **Modélisation et optimisation intelligentes** : Malgré la complexité et la dynamique non linéaire du système (GPV, batteries et moteur à courant continu), l'introduction de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) a apporté un saut qualitatif. Cette méthode métaheuristique a assuré un suivi rapide et précis du point de puissance maximale (MPPT), évitant ainsi le piégeage du système dans des extrema locaux causés par l'ombrage partiel ou les changements climatiques rapides.
- **Stabilité et maintien de la vitesse du moteur** : La vitesse de la motopompe, ainsi que sa réponse transitoire, sont restées parfaitement stables et alignées sur leur consigne. Le système a démontré son efficacité en s'affranchissant des oscillations mécaniques et en évitant toute chute du débit d'eau, même lors des baisses brusques et aiguës de l'ensoleillement.
- **Continuité de l'alimentation en énergie électrique** : L'approche a prouvé sa haute viabilité dans la gestion du déficit et du surplus énergétiques. En cas de chute de l'ensoleillement, le système de stockage par batteries prend le relais de manière fluide, automatique et totalement transparente pour alimenter le moteur via le convertisseur bidirectionnel, garantissant ainsi un approvisionnement électrique continu.
- **Contrôle centralisé et protection du stockage** : Le système de commande centralisé a géré efficacement les priorités de charge et de décharge des batteries. En les protégeant contre les surcharges, ce contrôle contribue directement à préserver et prolonger leur durée de vie.

Perspectives : À la lumière de ces résultats positifs, plusieurs axes de développement méritent d'être explorés à l'avenir :

1. Procéder à une validation expérimentale sur un banc d'essai réel ou via une plateforme de simulation en temps réel (HIL - Hardware-in-the-Loop) afin de confirmer la conformité des résultats numériques avec la réalité.

2. Comparer ou associer la commande PSO à d'autres techniques hybrides et intelligentes (telles que la logique floue) pour observer et analyser le comportement du système face à des dynamiques et des perturbations plus rapides et plus sévères.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] SAHI Wafa et BEGGAH Rofeyda Nor El yaquine , «simulation d'un système de pompage solaire pour l'irrigation d'une ferme agricole dans la région d'Ain Sefra », diplôme de Master, école supérieure en sciences appliquées Tlemcen, 2025
- [2] Julien Labbé, «l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, Soutenue le 21 décembre 2006.
- [3] Bendjamâa Ibrahim, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque», Mémoire de Magister de l'Université de Abou-Bakr Belkaid – Tlemcen, 2012.
- [4] FERRAH BILLEL, « Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien) », MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2014/2015
- [6] BOUHENNA Amina, « ÉTUDE DE L'IMPACT DES TECHNIQUES DE COMMANDE ET DES TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS STATIQUES AVANCÉES SUR LE COMPORTEMENT D'UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE DECENTRALISÉ», THÈSE de DOCTORAT, Soutenue le 26/01/2022
- [7] Ludmil STOYANOV. « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergies renouvelables. Energie électrique». UNIVERSITE PASCAL PAOLI, 2011. Français. <Tel-00653412>
- [8] Pinho, J.T., Araújo, R.G. « Wind-PV-diesel hybrid system for the electrification of the village of Sao Tome-municipality of Maracana-Brazil. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference», 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3511-3514, 2004.
- [9] Nouni, M.R., Mullick, S.C., Kandpal, T.C., (2007). Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India. Energy Policy, vol. 35, pp. 2491–2506, 2007.
- [10] Zini, G., Tartarini, P., (2010). Wind-hydrogen energy stand-alone system with carbon storage: Modeling and simulation. Renewable Energy, vol. 35, pp. 2461-2467, 2010.

- [11] Ntziachristos, L., Kouridis, C., Samaras, Z., Pattas, K., 2005. A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid. *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1471–1487, 2005.
- [12] Bowen, A.J., Cowie, M., Zakay, N., (2001). The performance of a remote wind-diesel power system. *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 429–445, 2001.
- [13] Notton, G., Cristofari, C., Poggi, P., Musseli, M., (2001). Wind hybrid electrical supply system: behaviour simulation and sizing optimization. *Wind Energy*, vol. 4, pp. 43-59, 2001.
- [14] Rothert, M., Wollny, M., (2006). Optimized operation management in hybrid systems. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 2335-2337, 2006.
- [15] Lundsager, P. (2001). Isolated systems with wind energy: Challenges and configurations. Risø National Laboratory, Denmark.
- [16] Engler, A. (2000). Control of interconnected island grids. International Energy Conference "Renewable Energy for the New Millennium", Sydney, Australia.
- [17] SÉGUIER Guy, "L'électronique de puissance", 7ème édition (ou plus récente), Édition Dunod, Paris.
- [18] HACINI Ismail [Kou 11], [Bri 12]. Pour l'obtention du diplôme de Magister
Soutenu le : 15 / 12 / 2015
- [19] [Sto 11] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de Doctorat de l'Université Technique de Sofia, 2011
- [20] F. Brihmat, « L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien », Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2012..
- [21] B. BOURGESM, « Improvement in Solar Déclinaison Computation », *Solar Energie*, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985
- [22] Shenzhen Infinite Power Technology Co., Ltd

[23] Boukhers Djamil, «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage», Mémoire de Magister de l'Université de Mentouri de Constantine, 28 / 11 / 2007.

[24] www.risen-solar.com.

[25] M.boukli-hacene Omar, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Mini d'un Convertisseur MPPT Pour Une Meilleure Gestion Energétique», Mémoire de Magister de l'Université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEN, décembre 2011.

[26] Yann Riffonneau, «gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau – Application à l'habitat », Thèse de doctorat de l'Université de JOSEPH FOURIER, soutenue le 23 octobre 2009.

[27] Damien Paire, «Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entrainements électriques hybrides : application à un ascenseur avec récupération d'énergie», Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, soutenue le 6 décembre 2010.

[28] 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 de l'École Normale Supérieure de Cachan, Soutenue le 9 décembre 2002.

[29] Mohamed A. Ould Yahya 1, A. Ould Mahmoud 1 et I. Youm 2, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) », Revue des Energies Renouvelables, CDER, Vol. 10 N°2, 2007.

[30] Hoang Anh Dang¹, Caroline GUYON², Benoit DELINCHANT¹, Patrick BEGUERY², Frédéric WURTZ¹ «Gestion de l'énergie électrique dans l'habitat, cas du stockage électrochimique», rapport de Schneider Electric, juin 2012.

[31] Damien Paire, Marcelo G. Simoes Jérémy Lagorse and Abdellatif Miraoui «A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system», , IEEE conférence, 2010.

[32] Asma Merdassi, «Outil d'aide à la modélisation moyenne de convertis Outil d'aide à la modélisation moyenne des convertisseurs statiques pour la simulation de systèmes

mécatroniques», Thèse de doctorat de L’Institut Polytechnique de Grenoble, Soutenue le 15/10/2009.

[33] M. Becherif, M.Y. Ayad et A. Miraoui, « Modeling and Passivity-Based Control of Hybrid Sources: Fuel Cell and Supercapacitors», ISA 2006, vol.3, USA, Oct 2006.

[34] Ionel Vechiu, «modélisation et analyse de l’intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat de l’université du Havre, Soutenue le 15 décembre 2005

[35] Clerc M., “Exemple de logiciel d'OEP sansparamètres de réglage. Tribes, ou la coopération de tribus”, Séminaire Optimisation par Essaim Particulaire OEP’03. Paris, octobre 2003.

[36] Ioan Cristian TRELEA, “L’essaim de particule vu comme un système dynamique : convergence et choix des paramètres”, conf, L’OEP essaim de particules, Paris, 2003

[37] Abdelmalek Gacem " Utilisation des méthodes d'optimisations métaheuristiques pour la résolution du problème de répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques", thèse magister Centre Universitaire d'El-oued

[38] BELLOUMI Rabie Optimisation par Essaim de Particules Application à un système complexe Soutenu devant le jury composé de : Dr. ARAR Djemai Prof. Université de BATNA 2

[39] Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons.

[40] Abbas El Dor. "Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique", thèse de doctorat en informatique Université Paris-Est, 2012

[41] Y. Shi and E. R. C. "Empirical study of particle swarm optimization". Vol. 3

[42] Mendes R.Kennedy J.Neves J.2003Proceedings of the 2003 IEEE 1, 88–94

[43] [CLERC, 2003] CLERC, M. (2003). Tribes - un exemple d’optimisation par essaim particulaire sans paramètres de contrôle. In Optimisation par Essaim Particulaire (OEP 2003)

[44] COOREN, Y. (2008). Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. PhD thesis, Université Paris 12

[45] Amaresh Saha, Sushanta Kumar Panigrahi, Sabyasachi Pattnaik. "Fast Convergence Particle Swarm Optimization for Functions Optimization" science direct Procedia Technology 4 (2012)

[46] : Ankit Yadav «MULTIOBJECTIVE OPTIMAL POWER FLOW», These Master Thapar University, Patiala ,India , Juliet, 2010