

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira – Béjaïa



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa



Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : électrotechnique

Spécialité : électrotechnique industrielle

Spécialité : énergie renouvelable

Thème

**Étude et gestion d'un système multi-source pour l'alimentation
d'un micro réseau**

Préparer par :

BAGOU Lounes

AMRIOU Sara

encadré par :

Mr. BERBOUCHA Ali

Mr. GHILAS Farid

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. BOUDRIES Zoubir

Mme. RAHRAH Karima

Promotion : 2023-2024

Remerciements

Introduction Générale

CHAPITRE 1 : État de l'art sur les systèmes d'énergie multi-source.

Introduction

1. Système multi-sources

1.1. Définition

1.2. Avantages

1.3. Inconvénients

2. L'énergie éolienne

2.1. Définition

2.2. Les types d'éoliennes

2.2.1. Les éoliennes à axe horizontales

2.2.2. Les éoliennes à axe verticales

3. L'énergie solaire

3.1. L'énergie photovoltaïque

3.1.1. Cellule photovoltaïque

3.1.2. Les avantages

3.1.3. Les inconvénients

3.1.4. Types de système photovoltaïque

3.1.4.1. Systèmes autonomes :

3.1.4.2. Système hybrides

3.1.4.3. Le système photovoltaïque relie aux réseaux

4. Les piles à combustible

4.1. Définition :

4.2. Principe de fonctionnement

5. Générateur diesel

6. Différentes combinaisons des systèmes multi-sources

- 6.1. PV + éolienne + stockage
- 6.2. PV + éolienne + diesel
- 6.3. PV + batterie + pile à combustible

7. Les systèmes de stockage

- 7.1. Accumulateurs
- 7.2. Super condensateur
- 7.3. Stockage avec l'air comprimé
- 7.4. Stockage à forme thermique
- 7.5. Stockage mécanique

8. les convertisseurs statiques

- 8.1. Redresseurs
- 8.2. Onduleurs
- 8.3. Hacheurs

9. Différentes architectures des système multi-source

- 9.1. Architecture à bus à courant continu (DC)
- 9.2. Architecture à bus à courant alternatif (AC)
- 9.3. Architecture mixte à bus (DC/AC)

Conclusion

CHAPITRE 2 : Description et dimensionnement du système multi-sources

Introduction

- 1. Description du système étudiant**
- 2. Modèle de module photovoltaïque**
 - 2.1. La modélisation du champ photovoltaïque
 - 2.1.1. Cas idéal
 - 2.1.2. Cas réel
 - 2.2. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire
 - 2.3. Groupement des cellules solaires
 - 2.3.1. Module photovoltaïque
 - 2.3.2. Panneau photovoltaïque
 - 2.4. Facteurs limitatifs du rendement
 - 2.4.1. Température
 - 2.4.2. Irradiances
 - 2.4.3. Résistance parallèle R_p

2.4.4. Résistance série R_S

2.4.5. Encrassement

2.4.6. Autres Facteurs Influent

3. Convertisseur DC/DC (boost) :

4. Convertisseur DC/DC (Buck/boost) bidirectionnel :

5. Modélisation d'une batterie par un circuit électrique équivalent

5.1. Modèles mathématiques des batteries

6. Caractéristique électrique super condensateur

7. Dimensionnement des éléments de système

7.1.Méthodologie de dimensionnement du système multi source

7.2.Estimation du flux total de rayonnement solaire sur une surface inclinée

7.3.Estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité

7.4.L'estimation de l'énergie journalière consommée par les différents équipements du village

7.5.Dimensionnement du champ photovoltaïque

7.6.Dimensionnement de stockage

7.6.1. Dimensionnement de batteries

7.6.2. Dimensionnement de super condensateur

Conclusion

CHAPITRE 3 : Gestion énergétique du système multi-source

Introduction

1. Organigramme des algorithmes de gestion
 - 1.1. Méthode de perturbation et observation (P&O)
 - 1.2. Organigramme de la P&O
2. Les profils d'irradiation et la température
3. Les profils de production de l'énergie solaire
4. Les besoins en énergie
5. Les différents modes possibles
6. Simulation du système globale
 - 6.1.Explication de déroulement du programme de gestion
 - 6.2.Résultat de simulations

Conclusion

CONCLUSION GENERALE

Liste des Tableaux

- Tableau I.1 :** Les types de panneaux solaires.
- Tableau II.1:** Données géographiques du lieu
- Tableau II.2:** Consommation énergétique journalière d'une maison
- Tableau II.3:** Besoin journalier du village
- Tableau II.4:** Fiche technique du module photovoltaïque PEIMAR SF400M
- Tableau II.5:** Le nombre de panneaux et la puissance crête du champ PV
- Tableau II.6:** Caractéristique de la batterie
- Tableau II.7:** Le nombre de batteries en série et en parallèle et le nombre total
- Tableau II.8:** Caractéristique de super condensateur

Liste de figures

- Figure I.1 :** Fonctionnement d'une éolienne
- Figure I.2 :** Eolienne à axe horizontal
- Figure I.3 :** Eolienne à axe verticale
- Figure .4 :** De la cellule au champ photovoltaïque
- Figure I.5 :** Le principe de cellule photovoltaïque
- Figure I.6 :** Schéma descriptif du principe de fonctionnement piles à combustible
- Figure I.7 :** Structure d'un super condensateur
- Figure I.8 :** Les convertisseurs statiques
- Figure I.9 :** redresseur
- Figure I.10 :** onduleur
- Figure I.11 :** hacheur
- Figure I.12 :** Configuration du SEH à bus continue
- Figure I.13 :** Configuration du système hybride à bus alternatif
- Figure I.14:** Configuration bus AC bus DC
- Figure II.1 :** Schéma d'un système d'énergie solaire avec stockage hybride (batterie +super condensateur)
- Figure II.2 :** Schéma électrique simplifié de la cellule solaire idéale
- Figure II.3 :** Schéma électrique simplifié d'une cellule solaire réelle
- Figure II.4 :** Caractéristique d'une cellule solaire
- Figure II.5:** Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule
- Figure II.6:** Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$ de la cellule

Figure II.7: Influence de la température sur la caractéristique $P = f(I)$ de la cellule

Figure II.8 : Influence du flux sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule solaire

Figure II.9 : Influence du flux sur la caractéristique $P = f(I)$ de la cellule solaire

Figure II.10: Influence du flux sur la caractéristique $P = f(V)$ de la cellule solaire

Figure II.11: convertisseur DC/DC boost

Figure II.12 : Convertisseur DC/DC (Buck/boost) bidirectionnel

Figure II.13: Modèle électrique d'une batterie

Figure II.14: Schémas électriques équivalents d'un super condensateur

Figure II.15: Plaque signalétique de panneau photovoltaïque

Figure II.16: Montage des panneaux photovoltaïques

Figure II.17: Montage des batteries

Figure III.1 : Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO. [28]

Figure III.2 : Organigramme de la P&O.

Figure III.3 : Evolution de l'ensoleillement.

Figure III.4: Evolution de la température.

Figure III.5: Puissance délivrée par le champ photovoltaïque

Figure III.6: Puissance demandée par la charge

Figure III.7 : Organigramme de système globale

Figure III .8 : Simulation du système global.

Figure III.9 : Puissance au niveau des batteries

Figure III.10 : Puissance délivrée à la charge

Introduction générale

La nature offre des sources d'énergie renouvelable, inépuisables, disponibles dans toutes les régions et respectent l'environnement. Les énergies les plus sollicitées sont : l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'évolution des technologies des composants rend la conversion de ces énergies de plus en plus rentable et donc leurs utilisations deviennent économiquement compétitives par rapport aux sources non renouvelables. Ces énergies sont exploitées en mono, ou en multi-source et en mode autonome ou connecté au réseau. [1]

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y a les systèmes multi sources. Pour les régions isolées ou éloignées, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Dans cette notion, on exclut les grands réseaux interconnectés dans lesquels les sources peuvent aussi être de plusieurs types. [2]

Les enjeux énergétiques mondiaux, combinés aux préoccupations environnementales croissantes, ont conduit à une évolution significative des systèmes de production et de gestion de l'énergie. Dans ce contexte, les micro-réseaux, qui intègrent des sources d'énergie renouvelable et des systèmes de stockage avancés, apparaissent comme des solutions prometteuses pour une gestion énergétique plus efficace et durable. Ce mémoire se concentre sur l'étude et la gestion d'un système multi-sources pour l'alimentation d'un micro-réseau, en mettant particulièrement l'accent sur les systèmes photovoltaïques associés à des technologies de stockage hybrides.

L'objectif principal de ce travail est de fournir une analyse détaillée et une modélisation précise des composantes essentielles d'un système multi-sources, tout en développant des stratégies de gestion optimisées pour assurer une alimentation continue et fiable du micro-réseau. Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en trois chapitres, chacun traitant d'aspects spécifiques mais complémentaires du sujet.

Dans le premier chapitre, les principales sources des énergies renouvelables sont présentées Avec les avantages et les inconvénients de chaque source. Par la suite, nous présentons le déférent type de stockage (batteries, super condensateurs...) et les différents types de convertisseurs statiques, ainsi quelque combinaison des systèmes hybrides.

Dans le 2ème chapitre nous allons modéliser les différents composants de notre système le module photovoltaïque, la batterie et le super condensateur de stockage, les convertisseurs d'énergie, nous présenterons aussi un dimensionnement pour le champ photovoltaïque et le stockage hybride.

Enfin, Dans le chapitre 3, nous présenterons l'algorithme de gestion utilisant la méthode PO (Perturber et Observer) ainsi que la simulation de notre système étudié, composé d'un stockage hybride de batteries et de super condensateurs. Nous analyserons les résultats des simulations sur un profil réel correspondant à une période de 48 heures.

Ce mémoire vise à améliorer la compréhension et la gestion des systèmes multi-sources pour les micro-réseaux. Les résultats attendus fourniront des solutions pratiques pour le

dimensionnement, la modélisation et la gestion optimisée de ces systèmes, favorisant l'utilisation efficace des énergies renouvelables.

Chapitre 1

État de l'art sur les systèmes d'énergie multi-source.

Introduction

La production d'énergie multi source présente un double avantage afin de minimiser les contraintes négatives sur l'environnement, vu l'élimination de problème de transport grâce à une consommation sur lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques.

Il existe plusieurs combinaisons de systèmes multi sources, à savoir : éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, et éolien-photovoltaïque-diesel, hybride-réseau électrique. Ces mêmes sources d'énergies peuvent être combinées avec d'autres sources telles que l'énergie hydraulique. Les méthodes d'évaluation des systèmes hybrides éolien/photovoltaïque autonome et leurs avantages se sont beaucoup développés ces dernières années. L'optimisation de l'énergie éolienne et photovoltaïque avec un stockage électrochimique (il existe d'autre solution de stockage notamment l'utilisation de l'hydrogène qui donne une autonomie beaucoup plus importante que celles des batteries d'accumulateurs), avec ou sans apport de diesel, dépend beaucoup des modèles économiques de chaque système pris séparément (éolien et photovoltaïque). [1]

Dans ce chapitre, nous examinerons l'état actuel de la recherche et des développements technologiques dans le domaine des systèmes d'énergie multi-source. Ces systèmes représentent une approche novatrice pour répondre aux besoins énergétiques diversifiés et aux défis environnementaux croissants. Nous explorerons les différentes architectures, les technologies clés et les applications des systèmes d'énergie multi-source, en mettant l'accent sur les avancées les plus récentes et les tendances émergentes.

1. Système multi-sources

1.1. Définition

Un système d'énergie multi-sources (SMS) ou Système Énergétique Hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise au moins deux technologies de la génération d'énergie ; une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des groupes diesel et au moins une source d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne, le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue.

Les performances d'un système multi-sources, le rendement et la durée de vie, sont influencés en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc., et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kilowattheure (KW), le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

Le champ d'application des systèmes multi-sources SMS est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance. [2]

Les grandes installations de SMS en site isolé peuvent être classifiées en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable défini par la proportion de la puissance (énergie) produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge.[2]

1.2. Les avantages

- Contribution à l'électrification des zones rurales.
Réduisent les factures d'électricité en s'appuyant sur des sources d'énergies renouvelables gratuites.
- Combinent plusieurs sources d'énergie, ce qui déminue la dépendance à une seule source d'énergie et assure une alimentation plus stable et plus sûre.
- Réduisent les risques des coupures électriques, particulièrement dans les zones isolées.

1.3. Les inconvénients

- La gestion complexe, car il faut coordonner les différentes sources d'énergie, le stockage et la distribution de l'électricité.
- La mise en place et la maintenance peuvent entraîner des coûts supplémentaires en termes d'infrastructure, de logiciels, de la formation de personnel et de gestion des données.
- Une technologie compliquer.

2. L'énergie éolienne

2.1. Définition

Cette technologie est utilisée depuis 2000 ans pour aider les hommes de convertir l'énergie éolienne en de nombreuses formes utiles, les éoliennes d'aujourd'hui sont capable de convertir une grande quantité d'énergie produite par le vent en électricité, ceci est du aux balles qui sont conçus en utilisant des techniques d'analyse aérodynamique de pointes est d'autres équipements améliorant les performances.

Une éolienne est un dispositif qui convertit la puissance de vent en énergie mécanique, dont le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. L'aérogénérateur produit de l'électricité en transformant l'énergie cinétique éolienne en énergie mécanique en faisant tourner les pales du rotor, ce dernier est lié à un alternateur qui va générer une puissance électrique alternative de type éolienne. [3]

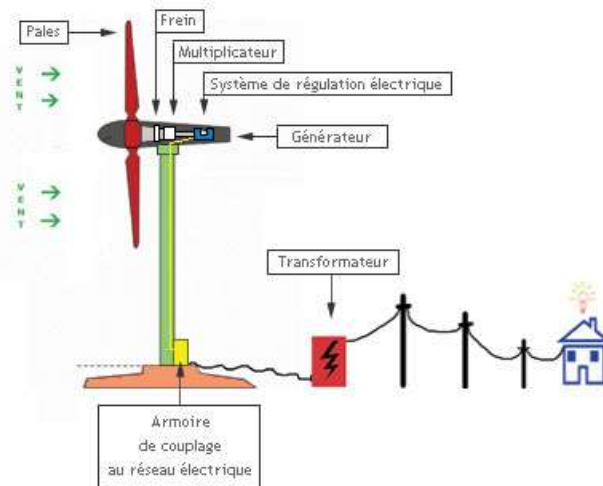


Figure I.1 : Fonctionnement d'une éolienne

2.2. Les types d'éoliennes

Les aérogénérateurs peuvent être classés selon deux catégories : des éoliennes à axe horizontale et celles à axe verticale.

2.2.1. Les éoliennes à axe horizontales

C'est le type d'éolienne le plus utilisé, souvent appelé « **HAWT** » (**H**orizontal **A**xis **W**ind **T**urbine) se caractérise par un rotor qui tourne sur un axe horizontal parallèle au sol. Deux configurations principales sont possibles amont et aval [4].

Au rang de ses points positifs : l'efficacité élevée, une adaptabilité à différents sites, la facilité d'accès pour la maintenir et l'adaptabilité à grande échelle. On peut aussi lui reprocher : le bruit, le besoin du vent régulier et l'impact sur la faune.



Figure I.2 : Eolienne à axe horizontal.

2.2.2. Les éoliennes à axe verticales

La **VAWT** (**V**ertical **A**xis **W**ind **T**urbine) possède un axe perpendiculaire au plan du sol, on distingue quatre configurations possibles Savonius, Darrieus, (H-Type) et les éoliennes à pales incurvées. Au rang des avantages majeurs de ce modèle il y a : une meilleure adaptation aux vents faibles, moins bruyantes par rapport au **HAWT** et moins d'impact visuelle. Les aspects négatifs de ce choix sont la sensibilité aux turbulences, puissance unitaire plus faibles et l'efficacité faible par rapport aux celles de l'axe horizontal.

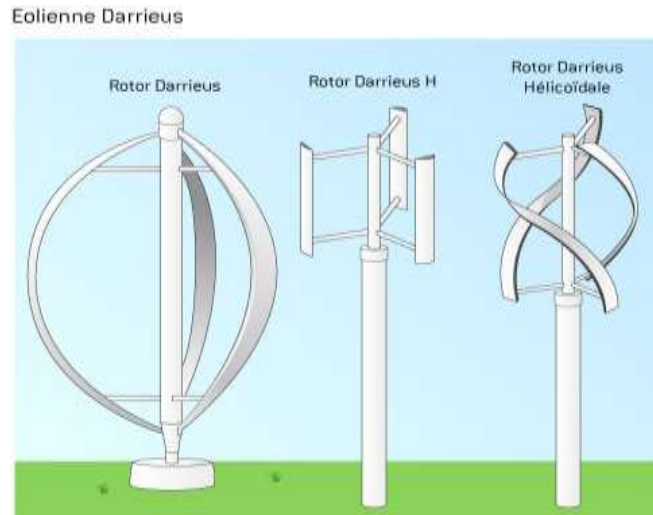


Figure I.3 : Eolienne à axe verticale.

3.L'énergie solaire

C'est une énergie inépuisable, tellement présente qu'on a tendance à l'oublier. Pourtant, cette énergie incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale en Énergie. Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable. Malheureusement on ne peut pas l'exploiter directement car il faut la transformer en d'autres formes d'énergies plus utiles :

- En bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive)
- En utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique)
- En transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules Photovoltaïques (énergie photovoltaïque) [5]

3.1. L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite par la conversion Du rayonnement solaire en électricité grâce à des panneaux solaires. C'est une énergie dite Renouvelable car sa source, le soleil, est une source quasi-inépuisable.[6]



Figure I.4 : De la cellule au champ photovoltaïque.

3.1.1. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).[7]

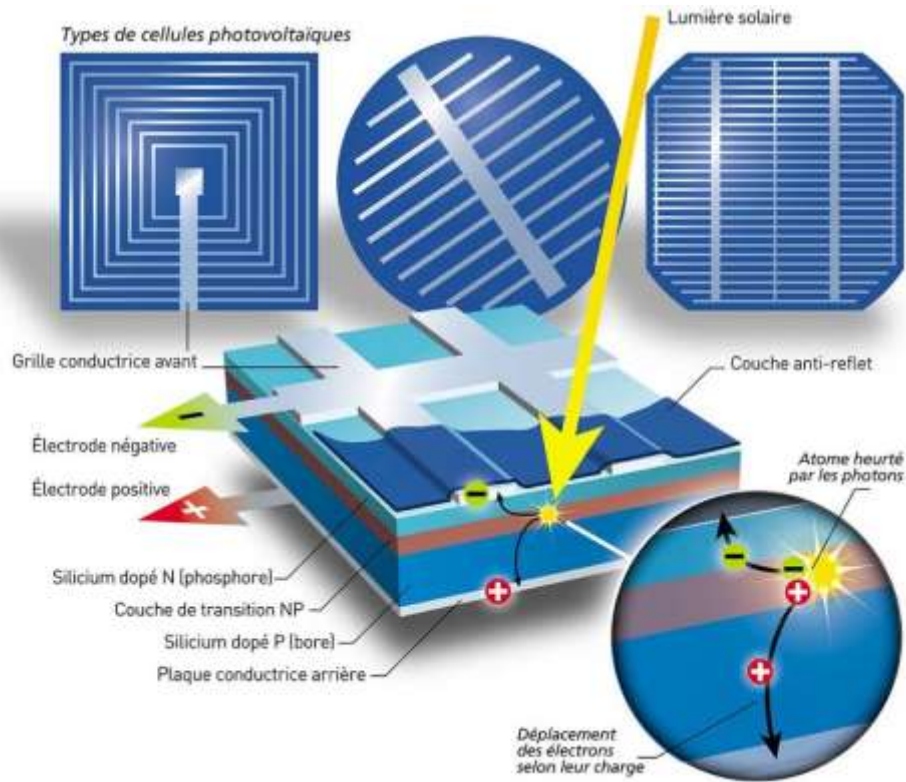


Figure I.5 : Le principe de cellule photovoltaïque.

La source d'énergie renouvelable la plus abondante sur terre était découverte par le scientifique français Edmond Becquerel 1839 après qu'il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant. En suite la découverte des caractéristiques ondulatoires des particules de la lumière par Albert Einstein (les photon) [8]

Il existe plusieurs types de panneaux solaires




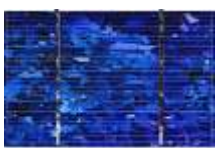




Technologie		Surface nécessaire pour $1kW_c$	η	Durée de vie (ans)	Prix d'un panneau 100W (2024) [1eur=148] [1usd=130]
HJT		$4.55m^2$	26.81%	30	Gamme basse à moyenne : 14 800 à 22 200 DZD Gamme haute : 22 200 à 37 000 DZD.
HIT		$5-6 m^2$	24.7%	25-30	Gamme basse à moyenne : 14 800 à 22 200 DZD Gamme haute : 22 200 à 37 000 DZD.
Silicium Monocristallin		$6-9 m^2$	15-20%	40	Gamme basse à moyenne : 10 360 à 17 760 DZD Gamme haute : 17 760 à 26 640 DZD
Silicium Polycristallin		$6-10m^2$	13-16%	25-35	Gamme basse à moyenne : 7 400 à 11 840 DZD Gamme haute : 11 840 à 17 760 DZD.
Couche mince cuivre-indium-tellure		$7-12.5 m^2$	7-14%	10-25	Gamme basse à moyenne : 5.000 DZD Gamme haute : 7.000 DZD
Cadmium-Tellure		$8.5-15 m^2$	7-13%	30	Gamme basse à moyenne : 4.00 DZD Gamme haute : 6.000 DZD
Silicium Micromorhe		$9-17m^2$	10.7%	25	Gamme basse à moyenne : 2.500 DZD Gamme haute : 4.500 DZD
Silicium Amorhe		$15-26 m^2$	6-7%	2-3	Gamme basse à moyenne : 3,000 DZD Gamme haute : 5,000 DZD

Tableau I.1 : Les types de panneaux solaires

3.1.2. Les avantages

- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.

- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme. Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.[5]

3.1.3. Les inconvénients

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.
- Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.
- Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau EDF).
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisées par les panneaux photovoltaïques sont composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement.[5]

3.1.4. Types de système photovoltaïque

Les systèmes PV sont trois types : autonome, hybride et reliés au réseau

3.1.4.1. Systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'Énergie électrique la plus économique.

3.1.4.2. Système hybrides

Les systèmes reboivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

3.1.4.3. Le système photovoltaïque relie aux réseaux

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu-courant alternatif (DC-AC)[9].

4. Les piles à combustible (PAC)

4.1. Définition

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique. [10]

4.2. Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes ; le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions.[10]

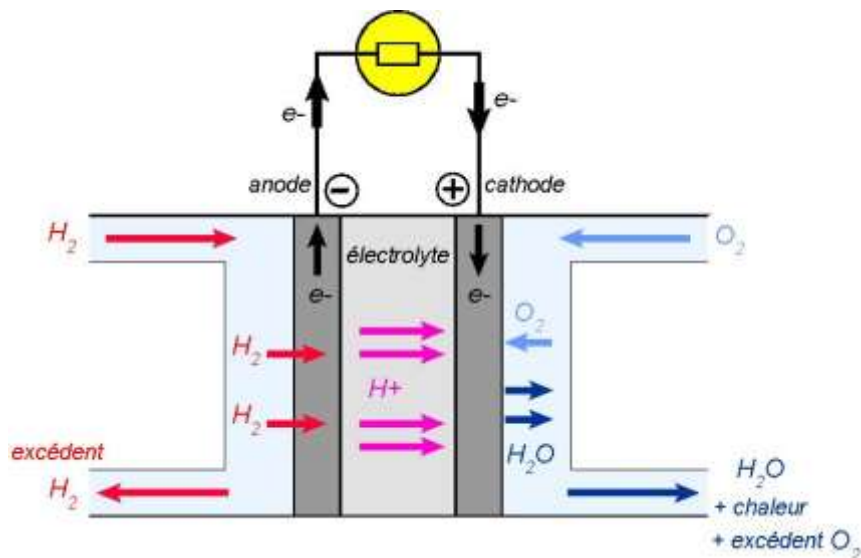


Figure I.6 : Schéma descriptif du principe de fonctionnement piles à combustible.

5. Générateur diesel

C'est une méthode de générer de l'électricité par un électrogène qui fonction avec le diesel en total autonomie, ce groupe peut être mis en fonctionnement de différentes manières manuellement, électriquement ou grâce à l'air comprimé selon sa puissance, la plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique leur taille et leurs poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes, en ce qui concerne les aspects positifs de cette méthode de générer l'énergie électrique: la production d'énergie en permanence dans les installations isolées du réseaux de distribution d'électricité en secours des installation déjà raccordé au réseaux en cas de manque de tension. Parmi ses limites : le besoin d'inspection quotidienne, des réversions périodiques ce qui requiert les services de professionnels.

Pour assurer la continuité de production d'énergie électrique dans un réseau autonome il est nécessaire de recourir au stockage d'énergie ou d'ajouter un ou plusieurs générateurs diesel. Le générateur classique est généralement constitué d'un moteur diesel qui est couplé à un générateur synchrone. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux de carburant de façon à garder la vitesse du moteur diesel et la vitesse du générateur synchrone constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré

Lorsque la puissance du GE change de sens (cas de configuration parallèle), le fonctionnement du GE est modifié. En effet, le courant circule dans le sens inverse : il est absorbé par l'alternateur et contribue à créer un couple qui va faire tourner le rotor et ainsi entrainer le moteur Diesel qui est couplé avec l'alternateur. Ce phénomène est connu sous le nom de monitoring car la machine synchrone fonctionne alors comme un moteur. Dans le cas de GE reliés au réseau, ce phénomène arrive lorsque l'alimentation du moteur Diesel est coupée ou insuffisante. En effet, lorsqu'il n'y a plus assez de couple pour faire tourner l'alternateur à la vitesse du réseau, celui-ci absorbe de la puissance du réseau et continue à tourner à la même vitesse (imposée par la fréquence du réseau). Dans le cas des systèmes d'énergie hybrides, le retour de puissance peut conduire à l'effondrement du système s'il est conséquent et prolongé. Lorsqu'une charge inférieure à la production de la source renouvelable est imposée, la fréquence du réseau crée par le GE augmente très rapidement et le système s'effondre à cause de la survitesse.

Le mécanisme mis en jeu est celui de la régulation de la vitesse du moteur Diesel. Un régulateur agit sur l'admission de combustible dans le moteur afin de maintenir constante. Par son principe même, le régulateur ne modifie la position de la vanne d'admission que si la vitesse de la machine varie. Quand la vitesse augmente, le régulateur diminue l'admission et la puissance décroît ; quand la vitesse diminue, le régulateur augmente l'admission et la puissance croît.[11]

6. Différentes combinaisons des systèmes multi-sources

L'hybridation consiste à associer plusieurs sources d'énergie et systèmes de stockage au sein de même système afin d'optimiser la production et la gestion de l'énergie [12]. Dans ce chapitre on va étudier trois combinaisons possibles :

6.1. Intégration des Énergies Renouvelables PV et Éolienne avec Systèmes de Stockage

En combinant des sources d'Énergie renouvelable comme les panneaux photovoltaïques et des éoliennes avec le stockage on obtient un système qui convertit la lumière de soleil et l'énergie cinétique du vent à une énergie électrique qu'on va stocker.

- **Avantages**

Réduction d'émission de gaz à effet de serre.

Amélioration de l'accès à l'électricité.

L'augmentation d'autoconsommation.

Autonomie accrue.

- **Inconvénients**

Coût élevé

Recyclage de batterie

Complexité

6.1. Hybridation des Sources d'Énergie PV et Éolienne avec Diesel

La même chose pour ce système mais en remplace le stockage avec un générateur diesel pour diminuer le cout initial et celles de maintenance. Ce qui offrent une solution prometteuse pour un approvisionnement en électricité durable fiable et économique, en particulier dans les zones isolées ou en cas de réseaux instable.

- **Avantages**

Production d'énergie plus fiable et plus complète.

Un cout d'exploitation optimisé.

L'émission de CO2 est réduite.

L'amélioration d'accès à l'électricité.

- **Inconvénients**

La nécessité une Analyse financière approfondie pour la viabilité de projet.

Impact environnemental potentiel.

La complexité de gestion de système.

6.3. Systèmes Énergétiques Hybrides PV et Batterie avec Pile à Combustible

L'association des panneaux photovoltaïque du stockage par batterie et des piles à combustible présente une combinaison prometteuse pour un système d'énergie renouvelable complet et plus durable.

- **Avantages**

La réduction d'empreinte du Carbon.

Une utilisation diminue des accumulateurs chimiques.

Fiabilité et résilience de système.

Applications larges.

- **Inconvénients**

L'hydrogène est difficile pour le stockage.

Coût initial élevé.

Complexités technologiques.

7. Les systèmes de stockage

7.1. Accumulateurs

Les accumulateurs électriques, sont des dispositifs qui permettent de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis la restituer sous forme de courant continu lorsqu'on a besoin. Ils sont devenus essentiels dans notre vie quotidienne, alimentant une multitude des appareils électroniques portables et des véhicules électriques.

Fonctionnement

Un accumulateur est composé de deux électrodes immergées dans un électrolyte. Lors de la charge, un courant électrique circule entre les électrodes, provoquant une réaction chimique qui stocke l'énergie sous forme d'ions dans l'électrolyte et sur les électrodes. A la décharge, la réaction chimique s'inverse, libérant des ions et produisant un courant électrique.

Types d'accumulateurs

Les batteries se distinguent par leur technologie et leurs caractéristiques :

- Batteries acide plomb : Technologie la plus ancienne est économique, mais moins performante et plus polluante que les autres types.
- Accumulateurs lithium-ion : Technologie dominante actuellement, offrant une haute densité d'énergie, une longue durée de vie et un faible effet mémoire.
- Accumulateurs NI-MH (nickel-métal-hydrure) : Moins denses en énergie que les lithium-ion, mais plus résistantes aux températures extrêmes et plus économiques.
- Accumulateurs au lithium-polymère : Dérivés des lithium-ions, plus flexibles et légers, mais plus onéreux.
- Accumulateurs à flux : Technologie émergente permettant un stockage stationnaire à grande échelle avec une grande flexibilité, mais encore peu répandue.
- Accumulateurs au Ni-Cd (nickel-cadmium) : Robustes et économiques, mais moins performantes et plus polluantes que les accumulateurs lithium-ion.

7.2. Super condensateur

Un super condensateur est un composant qui stocke l'énergie électrique dans un champ électrostatique, tout comme un condensateur classique. Cependant ils stockent beaucoup plus d'énergie. Ces condensateurs se composent de deux électrodes et l'électrolyte.

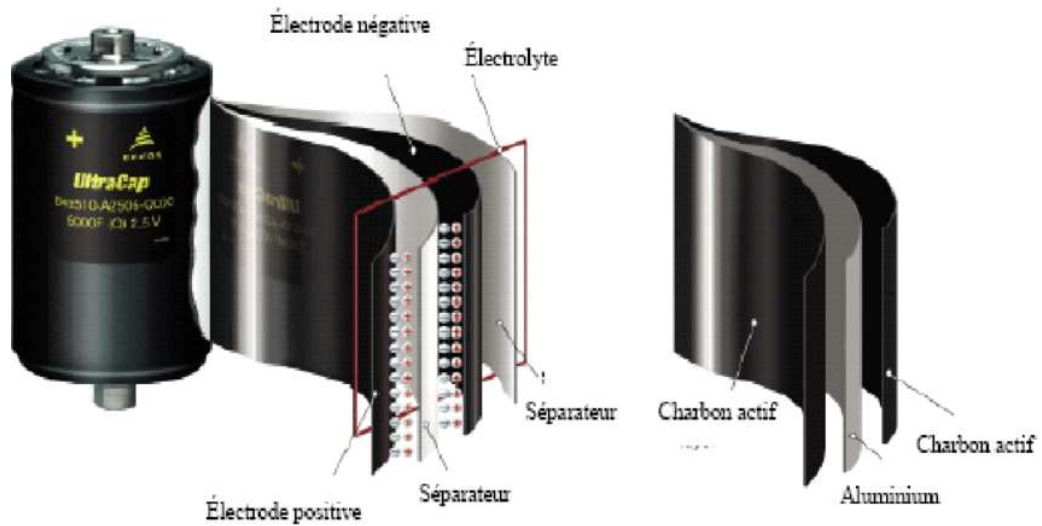


Figure I.7 : Structure d'un supercondensateur.

- **Avantages**

Puissance élevée

Longue durée de vie

Sécurité et fiabilité

Large plage de température

Capacité de stockage d'énergie élevée

Meilleure tenue de charge

Charge et décharge rapide

- **Inconvénients**

Coût plus élevée

Limitation de tension

Taille plus grande

Densité d'énergie plus faible

Difficulté de recyclage

7.3. Stockage avec l'air comprimé

Le stockage souterrain d'air comprimé (CAES) fait partie des solutions de stockage stationnaire de l'énergie électrique à très grande échelle. Ce type de stockage consiste à utiliser l'électricité excédentaire produite en heures creuses pour comprimer de l'air à très haute pression et le stocker dans un réservoir. Pendant les heures de pointe, l'énergie potentielle stockée est libérée en détendant cet air comprimé dans une turbine qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité.[13].

- **Avantages**

Stockage longue durée

Efficacité élevée

Respectueux pour l'environnement

Faible maintenance

Large gamme de température de fonctionnement

Sécurité et fiabilité

- **Inconvénient**

Besoin d'espace de stockage important

Coût initial élevé

Perte d'énergie par compression et décompression

7.4. Stockage à forme thermique

Stocker de l'électricité sous forme thermique permet de pallier à l'intermittence des énergies renouvelable comme l'éolienne et le solaire, en les stockent pendant les périodes de production excédentaire pour les utiliser ultérieurement lorsque la demande est élevée.

Cette peut s'appliquer dans des centrales thermiques à sels fondu ou pour

Deux principales approches existent (stockage par chaleur sensible) et (stockage par chaleur latente)

- **Avantages**

Stockage longue durée possible (heures jours saison).

Technologie mature et fiable.

Flexibilité : conversion chaleur-électricité ou l'utilisation directe de la chaleur stockée.

Bonne adéquation aux énergies renouvelable intermittent pertes.

- **Inconvénient**

Pertes thermiques inévitable, limitant l'efficacité du système.

Investissement initial important pour les grandes installations.

Besoin d'espace pour stocker les matériaux.

7.5. Stockage mécanique

Le stockage d'électricité sous forme mécanique consiste à convertir l'électricité excédentaire en énergie potentielle ou cinétique stockable, pour la restituer ultérieurement lorsque la demande est élevée. Cette technologie s'appuie sur des principes physiques

éprouvés et offre une solution viable pour l'équilibrage du réseau et l'intégration des énergies renouvelables intermittentes.

Les principales applications du stockage mécanique de l'électricité incluent les **STEP** (station de transfert d'énergie par pompage), volant d'énergie, stockage par air comprimé.

- **Avantages**

Stockage longue durée.

Technologie mature et fiable.

Flexibilité.

Bonne adéquation aux énergies renouvelable.

- **Inconvénient**

Pertes d'énergie.

Investissement initial élevé.

Besoin d'espace.

8.les convertisseurs statiques

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le DC en AC et vice-versa, est de maximiser la production de puissance des sources. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [14]

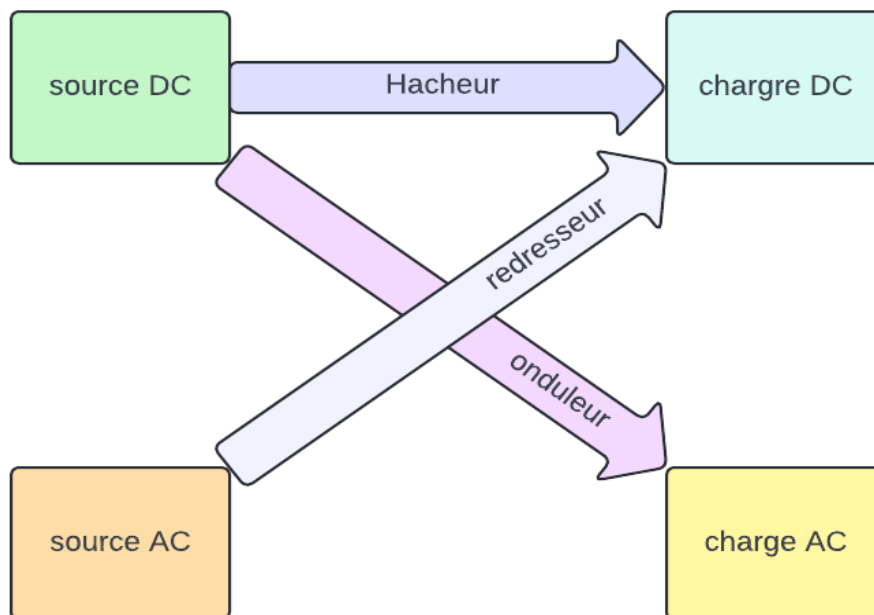


Figure I.8 : Les convertisseurs statiques.

8.1. Redresseurs

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu.[3]



Figure I.9 : redresseur.

8.2. Onduleurs

L'onduleur est un montage électronique permettant de transformer une tension continue en une tension alternative (sinusoïdale). Ils sont utilisés généralement pour la production de tensions alternatives, et aussi pour commander les machines à courant alternatif.[14]



Figure I.10 : onduleur.

8.3. Hacheurs

L'hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [3].



Figure I.11 : hacheur.

9. Différentes architectures des système multi-source

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, systèmes de stockage et des générateurs diesels se résument en trois types :

❖ Architecteur à bus à DC

❖ Architecteur à bus DC-AC (la connexion et mixte, bus à DC et bus à CA)

❖ Architecteur à bus à AC Nous présentons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.[10]

9.1. Architecture à bus à courant continu (DC)

Dans le système hybride présenté dans la figure, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à DC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à AC fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en DC. Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu.[10]

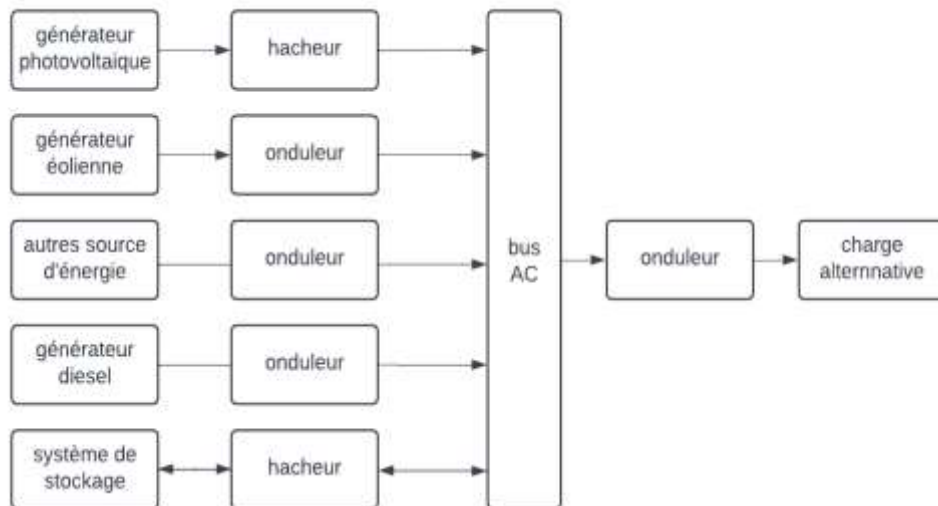


Figure I.12 : Configuration du SEH à bus continue.

- **Avantages**

La connexion de toutes les sources à un bus à CC simplifie le système de commande.

Le panneau photovoltaïque peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance maximale pendant la demande en puissance.

- **Inconvénient**

Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.

Les panneaux photovoltaïques et la pile à combustible ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge. [10]

9.2. Architecture à bus à courant alternatif (AC)

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 AC permet désormais de réaliser des systèmes flexibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelable que conventionnelles. [10]

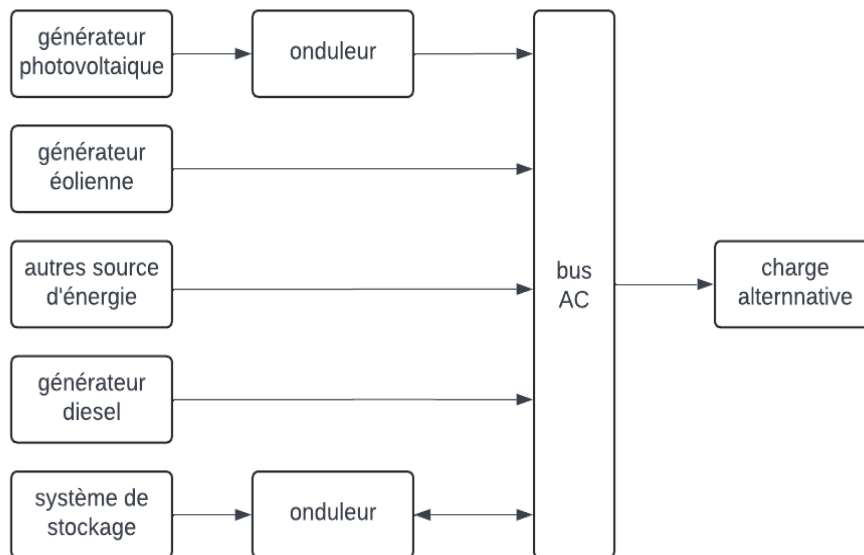


Figure I.13 : Configuration du système hybride à bus alternatif.

- **Avantages**

Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres.

Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus AC.

- **Inconvénient**

Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.

La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande. [10]

9.3. Architecture mixte à bus (DC/AC)

La configuration à deux bus, à DC et à AC, est présentée dans la figure. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration les sources d'énergies peuvent alimenter une partie de la charge à AC directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de l'onduleur. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui est en fonctionnement normal, réalise la conversion DC/AC (fonctionnement onduleur). [10]

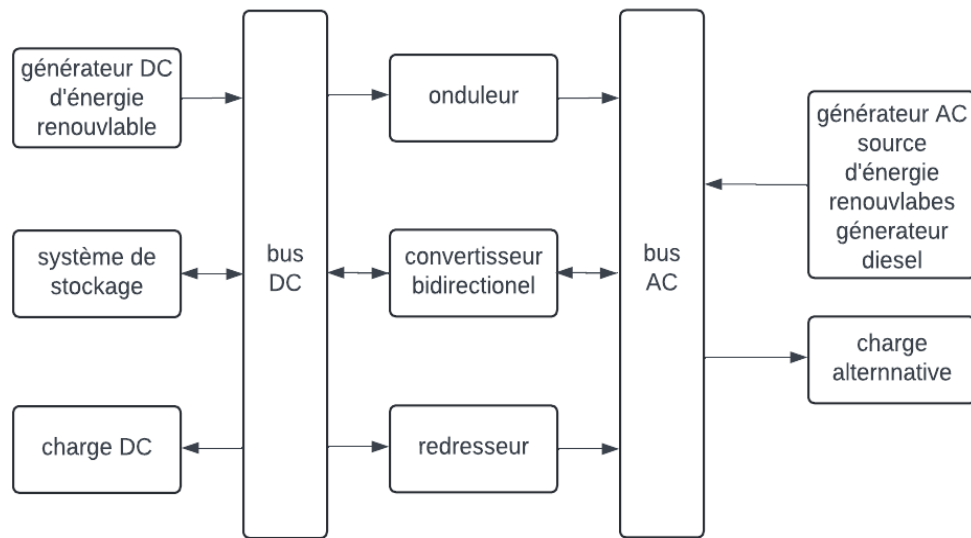


Figure I.14: Configuration bus AC bus DC.

- **Avantages**

Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.

La possibilité de réduire la puissance nominale de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

- **Inconvénient**

La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions de sortie du générateur AC).[10]

Conclusion

Ce chapitre a présenté un aperçu détaillé de l'état de l'art sur les systèmes d'énergie multi-source. En combinant différentes sources d'énergie et en intégrant des technologies de stockage et de gestion avancées, ces systèmes offrent des solutions énergétiques durables et flexibles pour diverses applications. Alors que la recherche et le développement dans ce domaine continuent de progresser, il est clair que les systèmes d'énergie multi-source joueront un rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique plus propre et plus résilient.

Chapitre 2

Description et dimensionnement du système multi-source.

Introduction

"Dimensionner" c'est fixer la "taille" et les caractéristiques optimales de chaque élément d'un système dont on connaît la configuration. En effet, le dimensionnement peut amener finalement à changer le système, par exemple s'il s'avère que des éléments "optimaux" sur le plan technique sont très chers, ou indisponible, etc., la méthode de dimensionnement consiste à déterminer d'abord la puissance crête qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant le mois le moins ensoleillé (généralement décembre). Elle consiste à déterminer le moment où vous avez besoin d'électricité, et à mesurer votre consommation. Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera vos résultats jusqu'à la fin, le résultat d'une étape influence directement le résultat des étapes suivantes. Si vous obtenez un résultat aberrant, ça ne veut pas forcément dire que vous vous êtes trompé dans vos calculs. Il ne faut pas hésiter à revenir en arrière, notamment à la première étape, afin de redéfinir vos besoins (comme par exemple réduire votre consommation en choisissant des appareils plus économiques) [10].

L'objectif de ce chapitre est de donner une description, dimensionnement pour un système. La configuration de ce système comporte un champ photovoltaïque, un bus DC, des convertisseurs de puissance, un système de stockage hybride composé d'un banc de batterie et de super capacité les deux sont connecté aux DC Bus avec deux convertisseurs statique bidirectionnel pour chacun, alimentant une charge DC. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques. L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC. Une simulation sous l'environnement du logiciel MATLAB de la structure proposée est effectué.

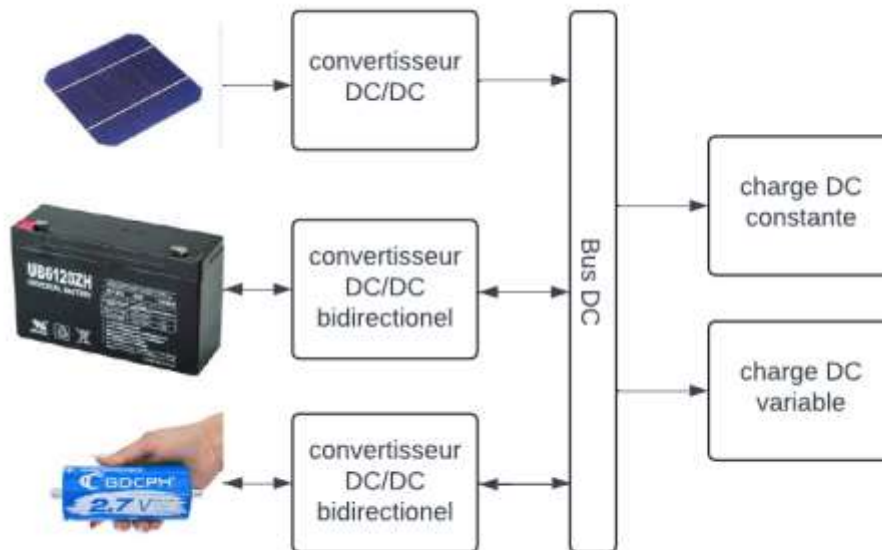


Figure II.1 : Schéma d'un système d'énergie solaire avec stockage hybride
(Batterie +supercondensateur).

1. Description du système étudié

Le système, illustré sur la **figure II.1**, combine un générateur photovoltaïque et un système de stockage hybride composé de batteries et de supercondensateurs. Les batteries offrent un stockage d'énergie sur une durée prolongée, tandis que les supercondensateurs permettent une absorption rapide des variations de courant, réduisant ainsi les contraintes sur les batteries.

Les batteries et les supercondensateurs sont connectés au bus continu par des convertisseurs DC/DC bidirectionnels qui prennent en charge le fonctionnement boost (élevateur) et Buck (abaisseur). Les charges DC sont divisées en deux catégories la première est constante la deuxième est variable, l'ensemble est relié à un bus DC.

2. Modèle de module photovoltaïque

Le modèle de Fuentes est donné par la relation suivante :

$$P_m = P_{max.réf} \left(\frac{G}{G_c} \right) [1 - \gamma(T_c - 25)] \quad (1)$$

Où, $P_{max.réf}$ est la puissance de référence dans les conditions standard de température (25°C) et d'éclairement (1000 W/m^2), γ est le coefficient de variation du rendement en fonction de la température, il est supposé constant et sa valeur pour les cellules en silicium est comprise dans l'intervalle $(0.0035 - 0.005) / ^\circ\text{C}$, et T_c étant la température de jonction des cellules exprimée en degrés Celsius ($^\circ\text{C}$) $T_{c,réf}$ est la température de référence prise égale à 25°C .

La température de jonction de la cellule solaire T_c est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_a + ((NOCT - 20)800) \times G \quad (2)$$

T_a et T_c sont les températures, ambiante et de jonction de la cellule PV ($^\circ\text{C}$), respectivement et G est l'irradiation solaire incidente sur le plan du module (W/m^2) le NOCT, appelé la température nominale des cellules en opération [15].

2.1. La modélisation du champ photovoltaïque

2.1.1. Cas idéal

La Figure ci-dessous représente le schéma électrique simplifié d'une cellule solaire idéale [16] :

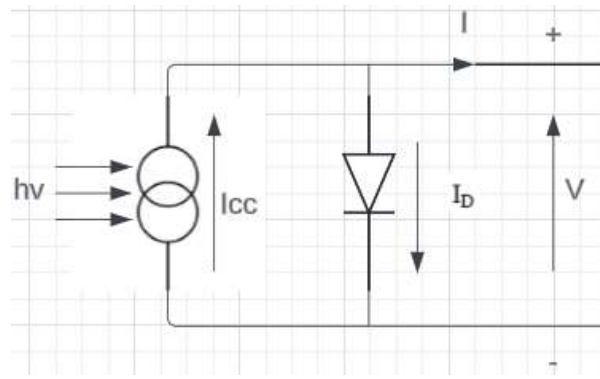


Figure II.2 : Schéma électrique simplifié de la cellule solaire idéale.

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{cc} - I_D = I_{cc} - I_0(e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad (3)$$

- I : courant fournis par la cellule.
- V : tension fournis par la cellule
- I_D : courant de diode donné par :

$$I = I_0(e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad (4)$$

2.1.2. Cas réel

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_S et R_P) [17].

- R_S : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semiconducteur, électrodes), elle s'exprime par :

$$R_S = \rho \frac{L}{S_g} + R_m \quad (5)$$

Avec :

- ✓ ρ : La résistivité de la grille.
- ✓ L : La longueur de la grille.
- ✓ S_g : Section des grilles collectrices.
- ✓ R_m : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible ($< 2\Omega$ pour les cellules au silicium)
- R_P : Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

R_S et R_P modifient le courant de court-circuit de la cellule, on aura donc le montage électrique équivalent suivant [17].

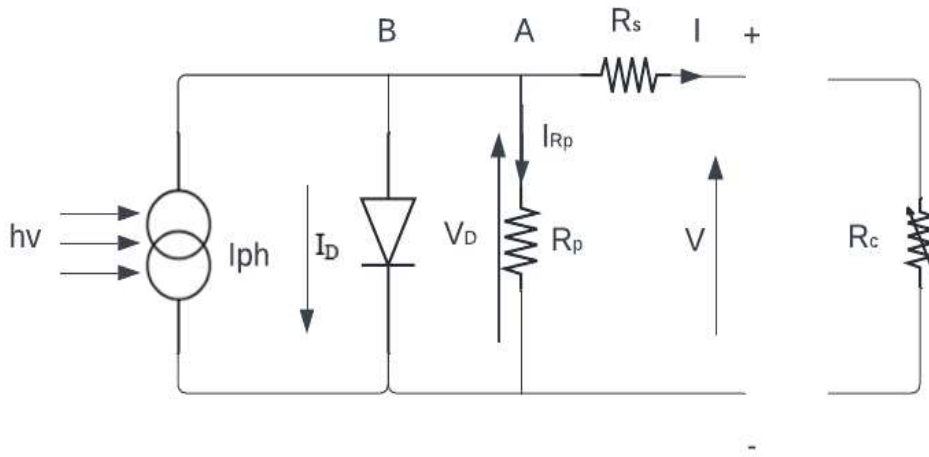


Figure II.3 : Schéma électrique simplifié d'une cellule solaire réelle.

Appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_R - I_{DP} \quad (6)$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

- I_{ph} : Photo courant indépendant de V (ou de R_s), il est proportionnel au flux incident (taux de génération-recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs.

$$I_{ph} = gq(L_n + L_p) \quad (7)$$

- I_{Rp} : Courant traversant R_p , si R_p est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension [16].

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (8)$$

Car :

$$V_d = R_p I_{Rp} = V + R_s I \quad (9)$$

- I_D : Courant diode, il est de même ordre de grandeur que I_{Rp} pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de V_{CO} , il s'écrit sous la forme

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) \quad (10)$$

Remplaçons dans (6) les équations (7), (8) et (9), l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (11)$$

- A : est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace.

- Pour les cellules actuellement commercialisées au Silicium, on prend $A=1$.

La représentation graphique $I = f(V)$ de l'équation (11) est illustrée dans la Figure II.4 :

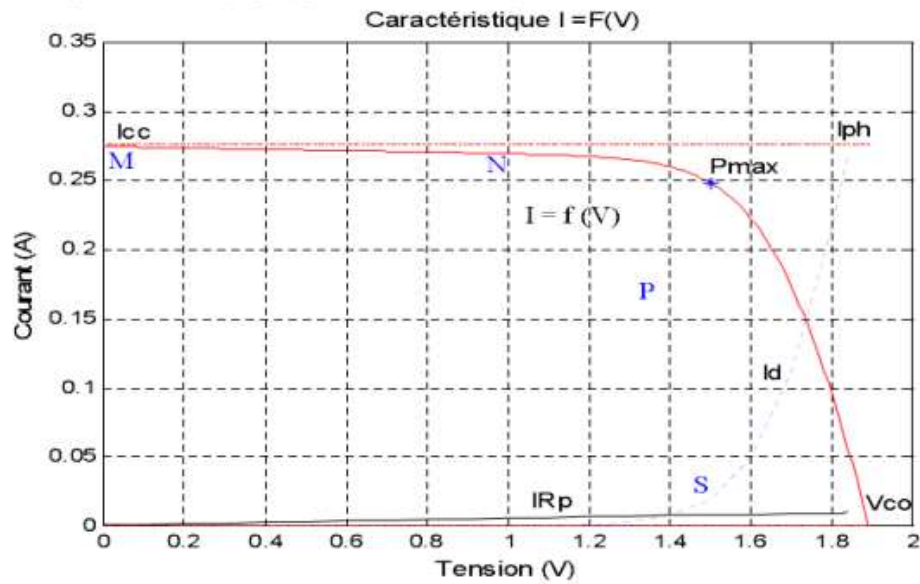


Figure II.4 : Caractéristique d'une cellule solaire.

Sachant que le courant généré est donné par l'équation (11) et que la cellule fonctionne sous un éclairage fixe E et une température constante T . Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones :

- Zone MN : Le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.
- Zone PS : Région correspondante aux valeurs élevées de RC . La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- Zone NP : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

2. 2. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV :

- Courant de court-circuit I_{CC}

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (11) :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qR_S I_{CC}}{KT}} \right) - \frac{R_S I_{CC}}{R_P} \quad (12)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$)

$$I_{cc} = I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad (13)$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_s et R_p , le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

- Tension on circuit ouvert

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (11) :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (14)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_s \rightarrow 0$, $R_p \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$ et $A=1$)

$$V_{CO} = \frac{nKT}{q} \log \left[1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right] \quad (15)$$

- Facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (16)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique $I = f(V)$.

- Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{E \cdot S} \quad (17)$$

- ✓ S : Surface de la cellule solaire.
- ✓ E : Flux incident.
- ✓ (I_m, V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement [16].

2.3. Groupement des cellules solaires

2.3.1. Module photovoltaïque

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante [18] :

$$I' = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q}{n \cdot AKT}(V' + R_{se} I')} - 1 \right) - \frac{V' + R_{se} I'}{R_{pe}} \quad (18)$$

Avec I' : Le courant débité par le module photovoltaïque.

Et : R_{se} et R_{pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = n \cdot R_s \quad \text{Et} \quad R_{pe} = n \cdot R_p$$

2.3.2. Panneau photovoltaïque

La modélisation d'un panneau composé de NS modules en série et NP modules en parallèle est [19] :

$$I' = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(e^{\frac{q}{n \cdot A K T S} (V' + R_{se} I')} - 1 \right) - N_p \frac{V' + R_{se} I'}{R_{pe}} \quad (19)$$

Avec : R_{se} et R_{pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = n \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot R_S \quad \text{Et} \quad R_{pe} = n \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot R_P \quad (20)$$

2.4. Facteurs limitatifs du rendement

2.4.1. Température

La température ambiante peut avoir un impact sur la performance des panneaux solaires. Les panneaux solaires peuvent voir leur rendement diminuer à mesure que la température augmente. Cela est dû à l'effet de la chaleur sur les propriétés des matériaux utilisés dans les panneaux solaires. Il est important de prendre en compte la température ambiante lors de la planification de l'installation pour s'assurer d'une performance optimale [20]. L'influence de la température sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures (II.5), (II.6) et (II.7) pour un éclairement fixe $E = 1000 \text{ W/m}^2$.

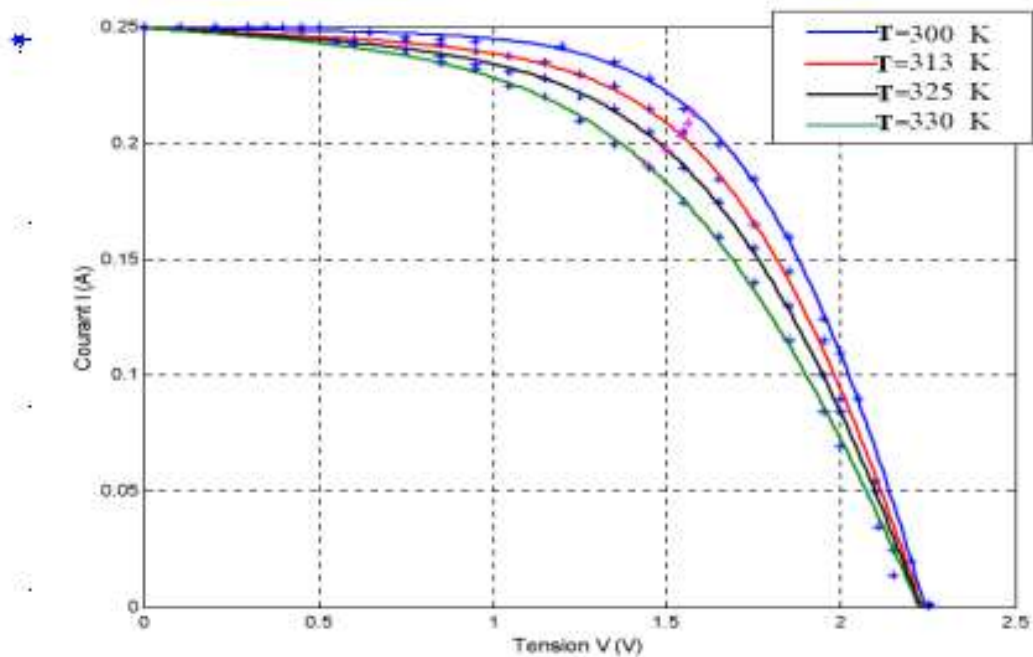


Figure II.5: Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule.

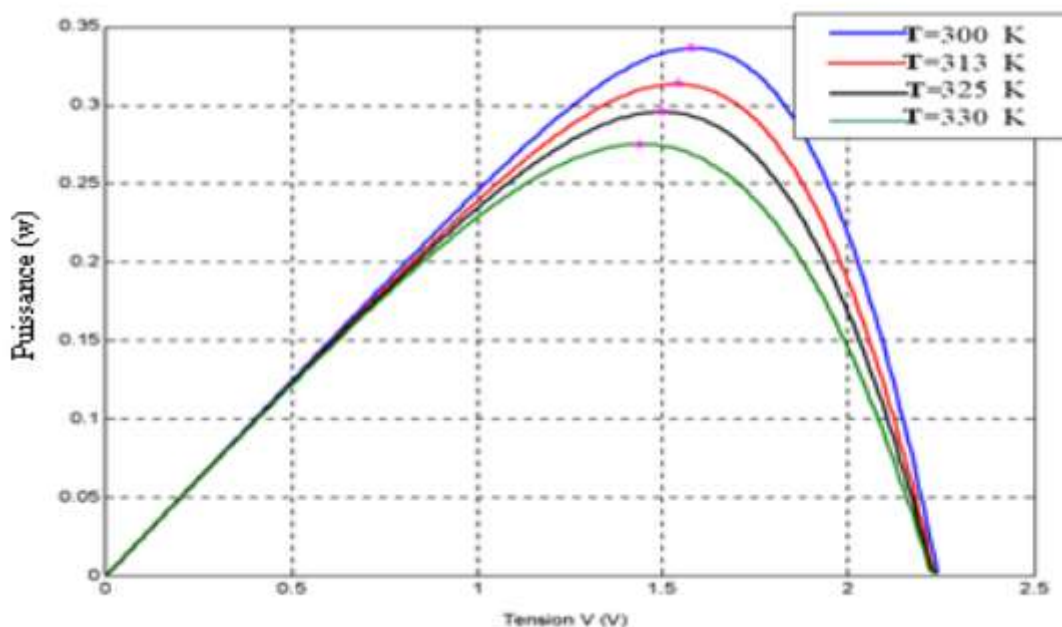


Figure II.6: Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$ de la cellule.

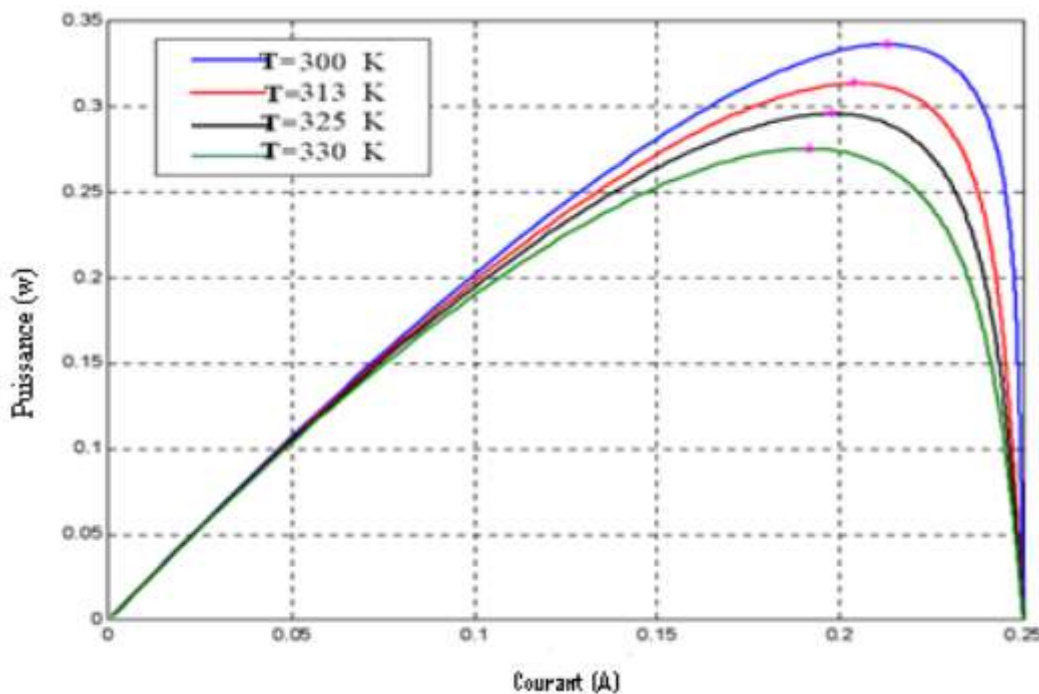


Figure II.7: Influence de la température sur la caractéristique $P = f(I)$ de la cellule.

2.4.2. Irradiances

Les irradiances solaires, c'est-à-dire la quantité de rayonnement solaire atteignant les panneaux solaires, ont un impact direct sur leur production d'énergie. Des irradiances élevées, telles que celles observées en plein soleil, augmentent la production d'électricité, tandis que des irradiances faibles, comme par temps nuageux, réduisent la production. L'emplacement

géographique, l'orientation des panneaux et les conditions météorologiques jouent un rôle dans les niveaux d'irradiance [20].

L'influence d'irradiances sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures (II.8), (II.9) et (II.10) à une température constante $T = 25^\circ\text{C}$.

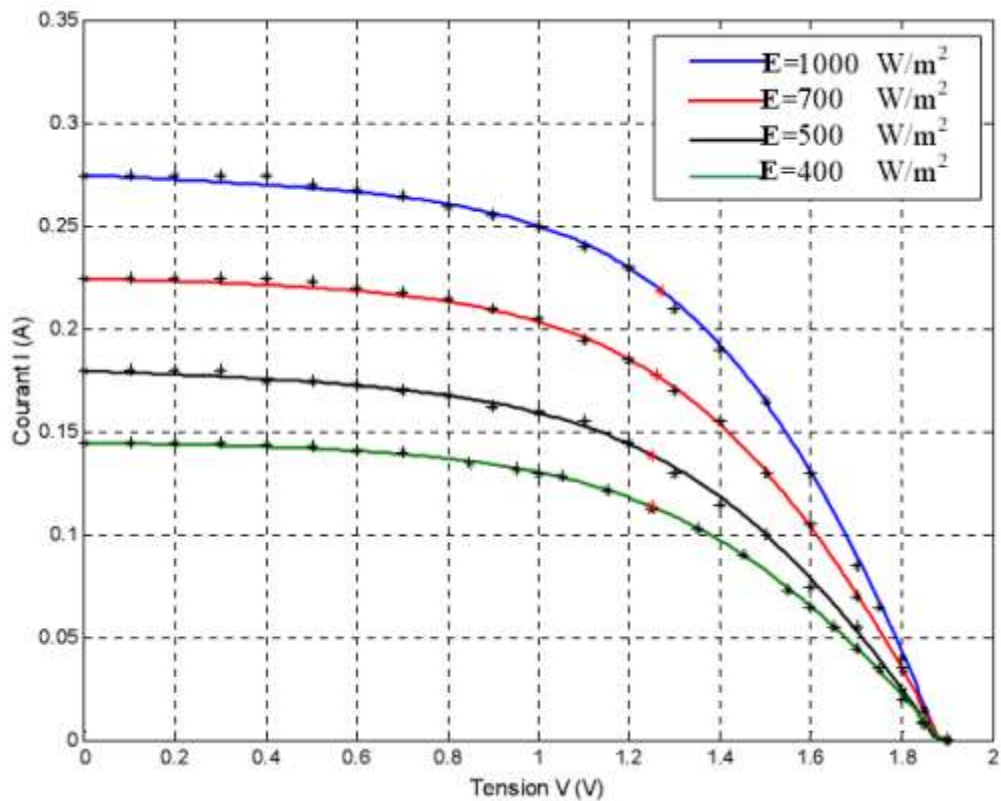


Figure II.8 : Influence du flux sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule solaire.

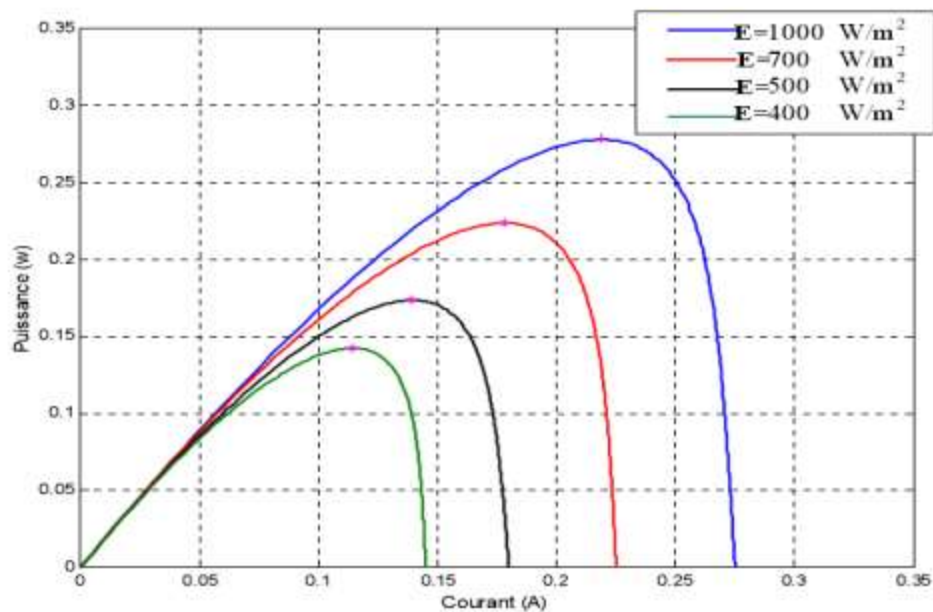


Figure II.9 : Influence du flux sur la caractéristique $P = f(I)$ de la cellule solaire.

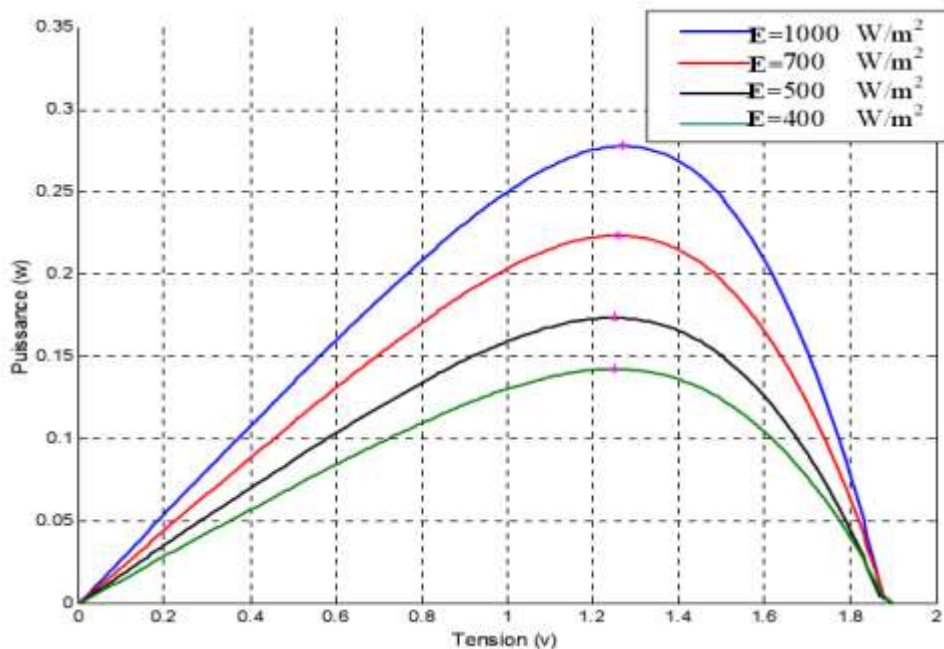


Figure II.10: Influence du flux sur la caractéristique $P = f(V)$ de la cellule solaire.

2.4.3. Résistance parallèle R_P

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. L'existence des fissures et des défauts des structures complexes le siège de phénomène physique devient assimilable aussi à une résistance parallèle (R_P).

Ordre de grandeur de R_P pour une cellule au Si : $R_P = 102$ à 104Ω . R_P augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [16].

2.4.4. Résistance série R_S

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [16].

2.4.5. Encrassement

L'encrassement des panneaux solaires, dû à l'accumulation de poussière, de saleté, de feuilles ou d'autres débris, peut réduire considérablement leur performance. Une surface sale empêche la lumière solaire d'atteindre efficacement les cellules photovoltaïques, entraînant une diminution de la production d'énergie. Il est important de nettoyer régulièrement les panneaux solaires pour maintenir leur efficacité [20].

2.4.6. Autres Facteurs Influent

Outre les facteurs mentionnés, d'autres éléments peuvent influencer la performance des panneaux solaires. Parmi ceux-ci, on retrouve l'ombrage partiel ou complet, la qualité des matériaux utilisés dans les panneaux, la configuration du système, et les pertes de câbles et de

connexions. Il est essentiel de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de l'installation du système solaire pour maximiser son rendement.

3. Convertisseur DC/DC (boost)

Un convertisseur de type boost est un dispositif DC-DC qui élève la tension, avec une tension de sortie toujours supérieure à la tension d'entrée. Les systèmes photovoltaïques (PV) utilisent des convertisseurs boost afin de réduire le nombre de cellules nécessaires, car ils permettent d'atteindre le niveau de tension souhaité. La (Figure II.11) illustre la structure d'un convertisseur boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

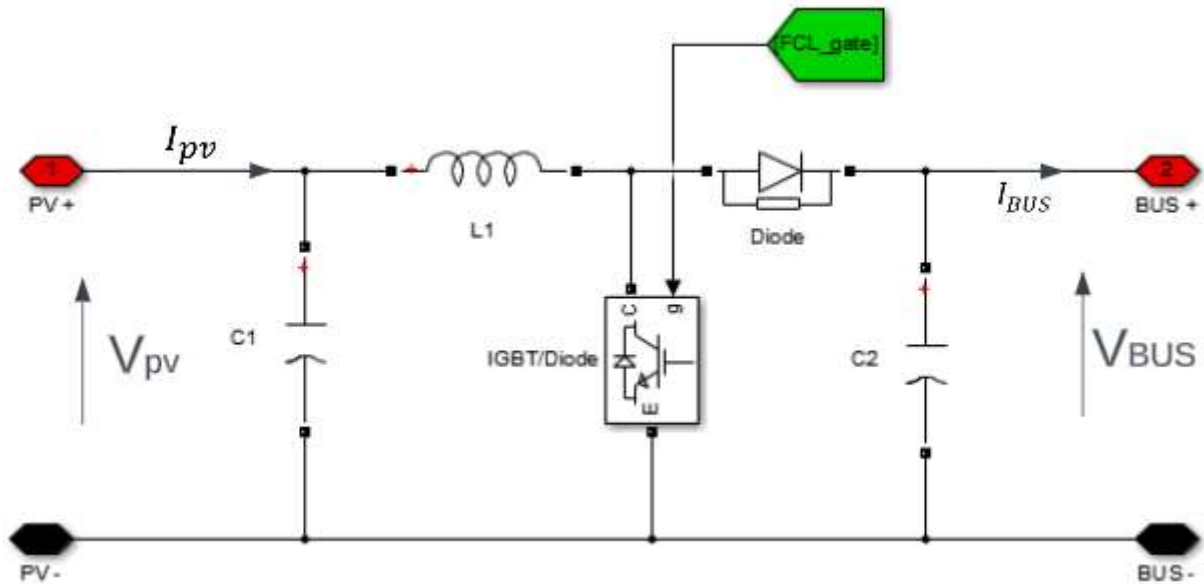


Figure II.11: convertisseur DC/DC boost.

$$\%D = 1 - \frac{V_{pv} \times \eta}{V_{BUS}} \quad (20)$$

$$\frac{V_{BUS}}{V_{pv}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (21)$$

$$I_{BUS} = \frac{P_{BUS}}{V_{BUS}} \quad (22)$$

$$di = \Delta I \times I_{BUS} \times \frac{V_{BUS}}{V_{pv}} \quad (23)$$

$$dV = 1\% \times V_{BUS} \quad (24)$$

$$L = \frac{V_{pv}(V_{BUS} - V_{pv})}{di \times f_s \times V_{BUS}} \quad (25)$$

$$C = \frac{I_{BUS} \times \%D}{f_s \times dV} \quad (26)$$

4. Convertisseur DC/DC (Buck/boost) bidirectionnel

Le principal objectif du convertisseur de batterie est de maintenir une tension constante sur le bus continu. Ainsi, quelle que soit la charge ou la décharge de la batterie, la tension du bus à courant continu reste stable, ce qui réduit considérablement l'ondulation dans le condensateur. Lors de la charge, le commutateur MOSFET 2 est activé et le convertisseur fonctionne comme un circuit de type Boost. En revanche, lors de la décharge, le commutateur MOSFET 1 est activé et le convertisseur fonctionne comme un circuit Buck.

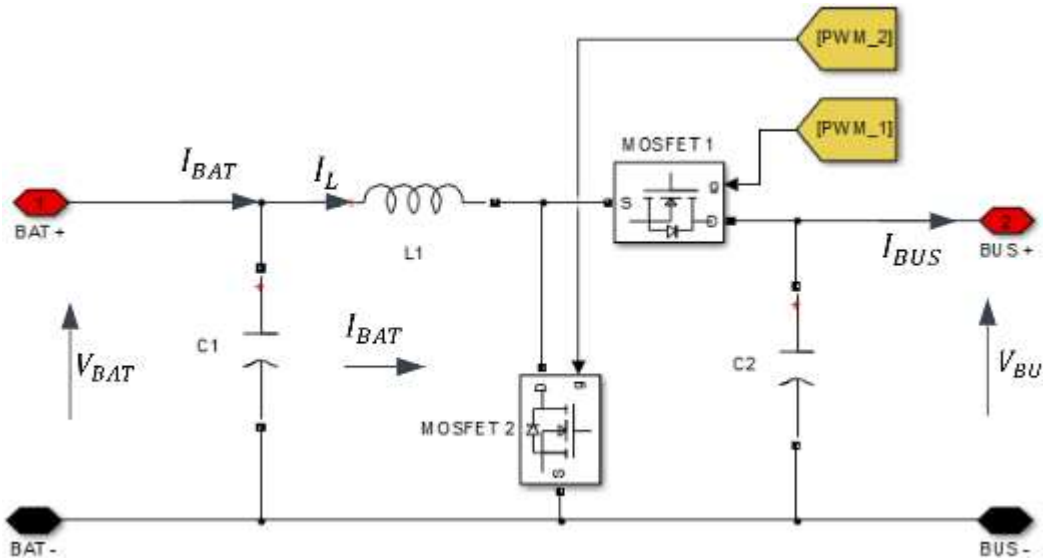


Figure II.12 : Convertisseur DC/DC (Buck/boost) bidirectionnel.

$$L = \frac{V_{BUS}}{4 \times f_{sw} \times \Delta I} \quad (27)$$

$$C_1 = \frac{I_{BAT}}{f_{sw} \times \Delta V_{BUS}} \quad (28)$$

$$C_2 = \frac{\Delta I}{8 \times f_{sw} \times \Delta V_{BUS}} \quad (29)$$

$$\frac{V_{BUS}}{B_{BAT}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (30)$$

- Les équations électriques pour le mode **Boost** sont :

$$L_1 \frac{dI_L}{dt} = V_{BAT} - (1 - (PMW_2))V_{BUS} \quad (31)$$

$$C_2 \frac{dV_{BUS}}{dt} = (1 - (PMW_2))I_L + I_{BUS} \quad (32)$$

- Les équations électriques pour le mode **Buck** sont :

$$L_1 \frac{dI_L}{dt} = V_{BAT} - (PMW_1)V_{BUS} \quad (33)$$

$$C_2 \frac{dV_{BUS}}{dt} = (PMW_1)I_L - I_{BUS} \quad (34)$$

5. Modélisation d'une batterie par un circuit électrique équivalent

La cellule électrochimique se comporte globalement comme une impédance sous une excitation donnée. On représente alors son fonctionnement par un circuit électrique formé de sources de tension, de résistances, de capacités et éventuellement d'inductances qui laisse passer le courant avec la même amplitude et la même phase que la vraie cellule sous cette excitation [21].

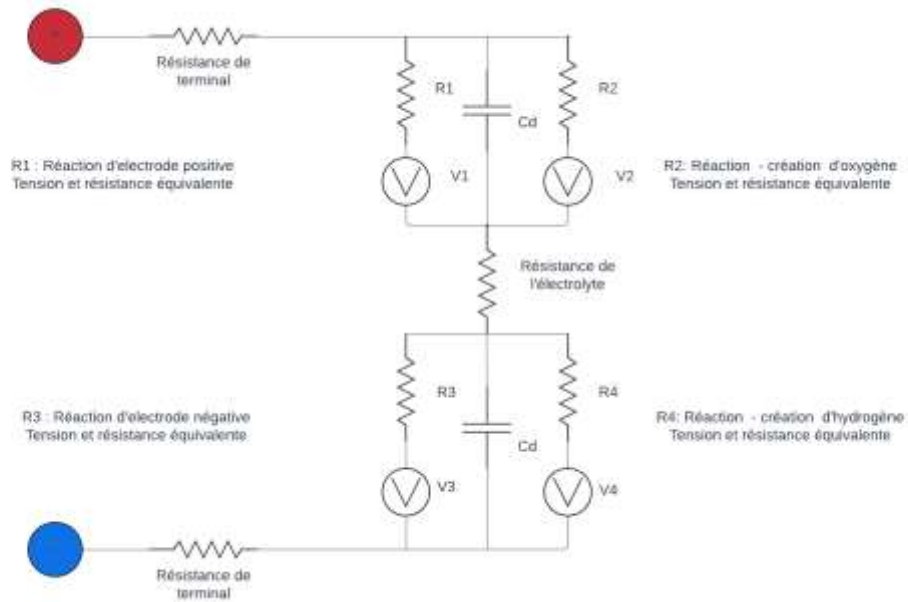


Figure II.13: Modèle électrique d'une batterie.

5.1 Modèles mathématiques des batteries

On peut généraliser tous les modèles mathématiques des batteries de décharge et charge dans ces deux équations [21].

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s) \quad (35)$$

$$f_c(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1.Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s) \quad (36)$$

Avec

f_d : Équation de décharge.

f_c : Équation de charge.

$f(S)$: Equation caractéristique pour chaque type de batterie

6. Caractéristique électrique supercondensateur

La modélisation la plus simple d'un supercondensateur est composée d'une capacité idéale en série avec une résistance (modèle RC simple), mais ce modèle ne permet pas de prendre en compte tous les phénomènes existants au sein d'un supercondensateur. Un autre modèle similaire au précédent qui modélise l'effet de l'autodécharge en ajoutant une résistance en parallèle avec la capacité. Il existe un autre modèle non linéaire qui contient plusieurs branches RC en parallèle. La première branche de ce dernier possède une capacité variable en fonction de la tension, mais ce modèle est pris et simplifié à deux branches RC. La première branche dite principale décrit les phénomènes rapides (charge, décharge) et la deuxième dite lente pour décrire la redistribution interne de l'énergie après les dits phénomènes [22].

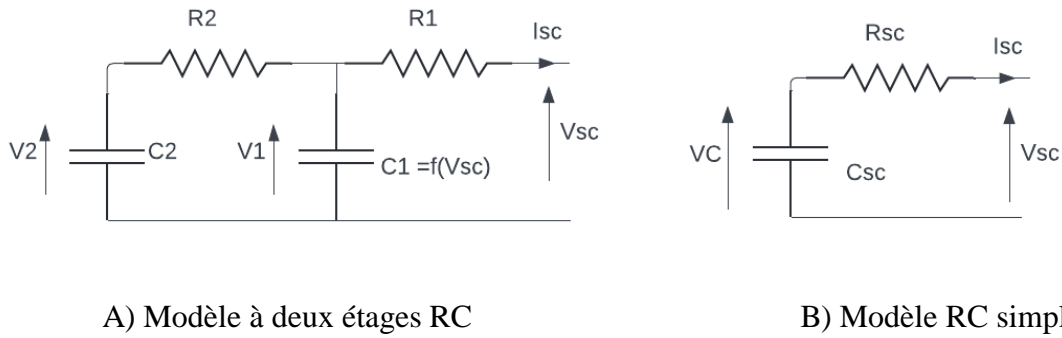


Figure II.14: Schémas électriques équivalents d'un supercondensateur.

A partir du modèle à deux étages RC de la figure précédente, les équations suivantes peuvent être extraites :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{R_2} - I_{SC} \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{R_2} \\ V = V_1 - R_1 I_{SC} \end{cases} \quad (37)$$

Ce modèle peut aisément être modélisé grâce à une représentation sous forme d'équations d'état [15] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (38)$$

Où :

$$x = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, u = I_{SC}, y = V_{SC}, A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C_1} & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 1] \quad (39)$$

7. Dimensionnement des éléments du système

7.1. Méthodologie de dimensionnement du système multi source

La partie la plus complexe dans un système photovoltaïque est le dimensionnement, donc pour le faire d'une manière pertinente, on se sert d'une méthode simple qui nous facilite un peu la tâche. Cette méthode nécessite la succession des étapes suivantes :

- Détermination des besoins énergétiques des différents équipements électriques.
- La connaissance des ressources solaires locales (énergie solaire disponible de site par unité de surface).
- Calcul du nombre de modules photovoltaïques en fonction des ressources solaires répondant aux besoins de l'utilisateur.

- Étude des caractéristiques des autres composantes de l'installation solaire (capacité des batteries et les super condensateur ...).

Un bon choix de matériel pour cette installation, associé à un dimensionnement approprié garantissent la continuité de fonctionnement de l'installation [23].

7.2. Estimation du flux total de rayonnement solaire sur une surface inclinée

Les panneaux solaires peuvent être installés sur le sol ou sur la toiture, orientés vers la direction la plus ensoleillée, pour Bejaia ils sont orientés vers le sud et l'écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire [3].

7.3. Estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour. L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour $E_{cJ}(WH)$ est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir les télévisions, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, ... ; Elle est donnée par la loi suivante :

$$E_{cJ} = \sum E_J \quad (40)$$

Pour les équipements qui ne sont pas utilisés quotidiennement et pour tous les équipements à forte consommation, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit : [26]

$$E_J = n_J * P_J * t_J \quad (41)$$

P_J : Puissance journalière d'un équipement

t_J : Temps de fonctionnement

n_J : Nombre des équipements

Nous avons choisi le site de Bejaia où se situe le village, les coordonnées de site est représenté dans le Tableau ci-dessous :

Caractéristique	Longitude	Latitude	Altitude
Lieu de Bejaïa	4.4167 ^E	36.3500 N	392m

Tableau II.1: Données géographiques du lieu

Afin de répondre aux besoins en électricité d'un village, nous avons mis en place un système hybride combinant des panneaux photovoltaïques avec stockage de batteries et super capacité, Avant d'entamer le calcul de dimensionnement, il est essentiel de réaliser un bilan énergétique pour déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques et de batteries nécessaires à l'alimentation autonome de ce village.

7.4. L'estimation de l'énergie journalière consommée par les différents équipements du village

Le village à 350 maisons, nous prendrons la situation d'une maison pour le calcul de la charge qu'on multipliera par la suite par le nombre des maisons du village pour l'obtention de la charge totale du village.

Pour nos calculs nous allons considérer le besoin énergétique d'une maison de type moyen

Type de la charge	Puissance (W)	Nombre d'éléments	Durée d'utilisation (h)	Consommation journalière (Wh/j)
Télévision	200	1	8	1600
Réfrigérateur	300	1	24	7200
Machine à laver	300	1	1	300
Ordinateur portable	30	1	6	180
Modem wifi	5	1	12	60
Lampes	25	6	4	600
Chargeur téléphone	5	6	2	60
Total	865 W			10 000 Wh/j

Tableau II.2: consommation énergétique journalière d'une maison

Pour trouver la consommation énergétique journalière du village E_{cons} , on va multiplier l'énergie journalière consommée par une maison E_1 par le nombre de maisons du village N_m .

Energie journalière consommée par une maison E_1 [Wh/j]	Nombre de maisons du village N_m	Energie journalière consommée par le village E_{cons} [Wh/j]
10 000	350	$E_{cons} = E_1 * N_m$ 3500000 =3500KWh/j

Tableau II.3: Besoin journalier du village

Les caractéristiques du module photovoltaïque choisi pour établir ces dimensionnements, sont les suivantes :

Nom	PEIMAR SF400M
Type de cellule	Monocristallin
Tension maximale (V_{mpp})	38 V
Courant maximale (I_{mpp})	10.53A
Tension a circuit ouvert (V_{co})	45.60V
Courant de court-circuit (I_{cc})	11.16A
Poids	22Kg
Température de fonctionnement	-40 °C _ +85°C
Dimensions	1900 mm* 1048 mm* 40 mm
Rendement	20.09%
Prix	23 000 DA

Tableau II.4: Fiche technique du module photovoltaïque PEIMAR SF400M



Figure II.15: Plaque signalétique de panneau photovoltaïque

7.5. Dimensionnement du champ photovoltaïque

Pour le site de Bejaia, décembre est le mois où l'ensoleillement le plus faible, avec un maximum de 4 heures de soleil par jour. En tenant compte de pertes de 20% dues à la température et à la poussière, la puissance crête P_{pv} du champ photovoltaïque se calculera comme suit :

$$P_{pv} = \frac{E_{ele}}{h(\text{ensoleillement}) * (1 - \sum \text{pertes})} \quad (42)$$

Le nombre de panneaux utilisés peut se calculer de manière suivante :

$$N_{PV} \geq ENT \left[\frac{P_{pv}}{P_{pv.u}} \right] \quad (43)$$

Avec :

N_{PV} : Nombre de panneaux photovoltaïques.

P_{pv} : Puissance des panneaux photovoltaïques.

$P_{pv.u}$: Puissance du panneau photovoltaïque unitaire.

ENT : Entier

Application Numérique :

Besoin journalier [KWh]	La puissance crête du champ Photovoltaïque P_{pv} [KW]	Nombre de panneaux
3500	1093.750	2745

Tableau II.5: le nombre de panneaux et la puissance crête du champ PV

Après le calcul de nombre total de panneaux photovoltaïques nécessaires pour l'installation qui est 2745 panneaux, on raccorde 15 panneaux en série pour former des strings, nous avons calculé le nombre de panneaux en parallèle en utilisant cette équation :

$$N_{pv-para} = \frac{N_{pv}}{N_{pv-série}} \quad (44)$$

D'après l'équation précédente on obtient 183 panneaux en parallèle, ce qui nous permet de faire un schéma de montage pour les 2745 panneaux comme le montre la figure :

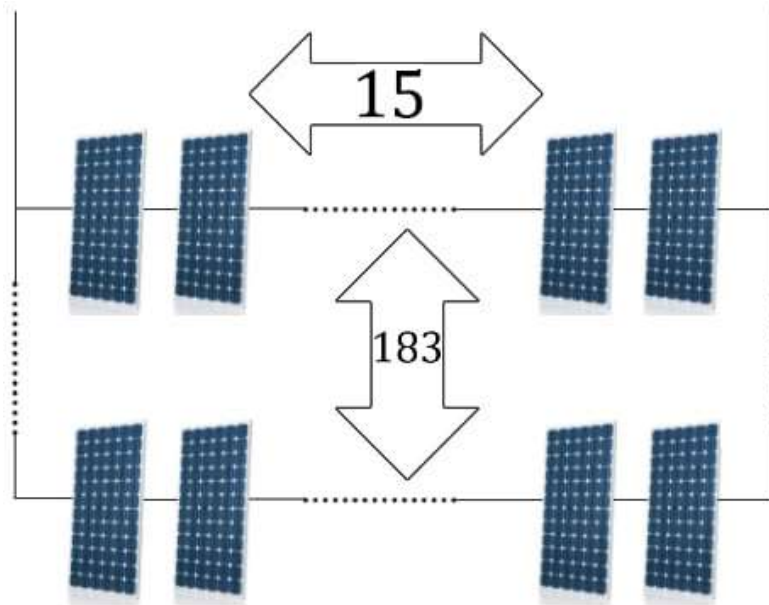


Figure II.16: Montage des panneaux photovoltaïques

7.6. Dimensionnement de stockage

Dans le cadre de notre étude, nous avons décidé de répartir le stockage de l'énergie de la manière suivante : 80 % de l'énergie sera stockée dans des batteries lithium-ion, tandis que les 20 % restants seront stockés dans des super condensateurs.

- Energie journalière à stocké dans les batteries = $80\% \times 3500 \text{ KWh} = 2800 \text{ KWh}$
- Energie journalière à stocké dans les super condensateurs = $20\% \times 3500 \text{ KWh} = 700 \text{ KWh}$

7.6.1. Dimensionnement de batteries

La batterie utilisée pour ce dimensionnement est en lithium ULTIMATRON Lifep04 Smart BMS et présente les caractéristiques suivantes :

Nom	ULTIMATRON Lifep04 Smart BMS
Tension nominale (V)	12.8
Capacité nominale (Ah)	150
Dimensions	330*172*215mm
Poids (Kg)	15.8
Prix	852 €

Tableau II.6: caractéristique de la batterie

Le calcul de la capacité C_{batt} nécessaires des batteries afin de stocker 80 % de besoin journalier du village dépend de plusieurs données, et peut être déterminé de la manière suivante :

$$C_{batt} = \frac{B_j \times J_{aut}}{V_{batt} \times PDD \times \eta_{batt}} \quad (45)$$

Le calcul du nombre de batteries utilisées peut se faire de la façon suivante :

$$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt,\mu}} \quad (46)$$

Avec :

J_{aut} : Nombre de jour d'autonomie.

PDD : Profondeur de décharge de la batterie

η_{batt} : Rendement de la batterie

V_{batt} : Tension de la batterie

N_{batt} : Nombre de batterie.

C_{batt} : Capacité des batteries

$C_{batt,\mu}$: Capacité unitaire de batterie.

On fixe une tension de 480V pour un ensemble de batteries connectées en série, chaque batterie ayant une tension de 12V, nous avons calculé le nombre de batteries en série en utilisant cette équation :

$$N_{batt_série} = \frac{U_{batt}}{U_{batt,u}} \quad (47)$$

Le calcul du nombre de batteries en parallèle :

$$N_{batt_para} = \frac{N_{batt}}{N_{batt_série}} \quad (48)$$

Application Numérique :

Capacité des batteries (Ah)	Nombre de batteries	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle
291 666.66	1960	40	49

Tableau II.7: le nombre de batteries en série et en parallèle et le nombre total

D'après les équations précédentes on obtient 40 batteries en série et 49 batteries en parallèle, ce qui nous permet de faire un schéma de montage pour les 1960 batteries comme le montre la figure :



Figure II.17: Montage des batteries.

7.6.2. Dimensionnement de super condensateur

Le super condensateur utilisé pour ce dimensionnement est présenté dans le tableau suivant :

Nom	Maxwell 48V 187.5F
Tension nominale (V)	48 V
Capacité nominale (F)	187.5 F
Température de fonctionnement	-40°C_+65°C
Prix	84 221,75 DZD

Tableau II.8: caractéristique de super condensateur

Pour calculer le nombre de super condensateurs nécessaires pour lisser les fluctuations et couvrir 20% de la consommation journalière d'un village avec une consommation de 3500 kWh/jour, nous allons suivre ces étapes :

La consommation journalière du village est de 3500 kWh. Nous voulons que les super condensateurs couvrent 20% de cette consommation :

$$\text{Energie à couvrir} = 0.20 \times 3500 \text{ kWh} = 700 \text{ kWh} = 700\,000 \text{ Wh}$$

L'énergie stockée dans un super condensateur est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (49)$$

Où C'est la capacité en Farads et V est la tension nominale.

$$E = \frac{1}{2} \times 187.5 \times (48 \text{ V})^2$$

$$E = \frac{1}{2} \times 187.5 \times 2304 = 216\,000 \text{ J}$$

Convertir les joules en wattheures :

$$216\,000 \text{ J} = \frac{216000}{3600} \text{ Wh} \approx 60 \text{ Wh}$$

Nous avons besoin de 700,000 Wh et chaque super condensateur peuvent fournir 60 Wh :

$$\text{Nombre de super condensateur} = \frac{700\,000 \text{ Wh}}{60 \text{ Wh/super condensateur}} \approx 11666$$

Donc pour couvrir 20% de la consommation journalière d'un village de 3500 kWh/jour il faudrait environ 11666 super condensateurs en utilisant des super condensateurs de 48 V et 187.5 F.

Pour obtenir une tension totale de 480 V à partir de super condensateur de 48 V, il faut les connecter en série. Il faut connecter 10 super condensateurs de 48 V en série pour atteindre une tension totale de 480 V.

Conclusion

La modélisation et le dimensionnement d'un système photovoltaïque avec stockage hybride de batteries et de super condensateurs met en évidence l'importance de combiner ces technologies pour optimiser la performance et la durabilité du système

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné notre système et modélisé les différents composants de notre installation photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC, batterie, super condensateur).

Le prochain chapitre traitera de la gestion du système hybride, en explorant les algorithmes et stratégies de contrôle pour coordonner efficacement l'énergie entre les panneaux photovoltaïques, les batteries et les super condensateurs

Chapitre 3

Gestion énergétique du système multi-source.

Introduction

La gestion énergétique des system multi-source est un domaine crucial pour l'optimisation de la production et de la consommation d'énergie pour an avenir énergique durable, en particulier dans le contexte de la transition énergétique et de la lutte contre le changement climatique. La gestion efficace de ces système complexe permet de maximiser l'utilisation d'énergie, réduire la dépendance aux combustible fossiles, améliorer l'équilibres entre la production et de la demande d'énergie, augmenter la fiabilité et la résilience de système. On prend en compte divers facteurs tel que les profils de production et les besoins en l'énergie des consommateurs, les caractéristiques des systèmes de stockage.

1. Organigramme des algorithmes de gestion

1.1.Méthode de perturbation et observation (P&O)

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} volontairement (augmenter ou diminuer) avec une constante C et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. Si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{pv-PPM} ceci cause alors une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.[27]

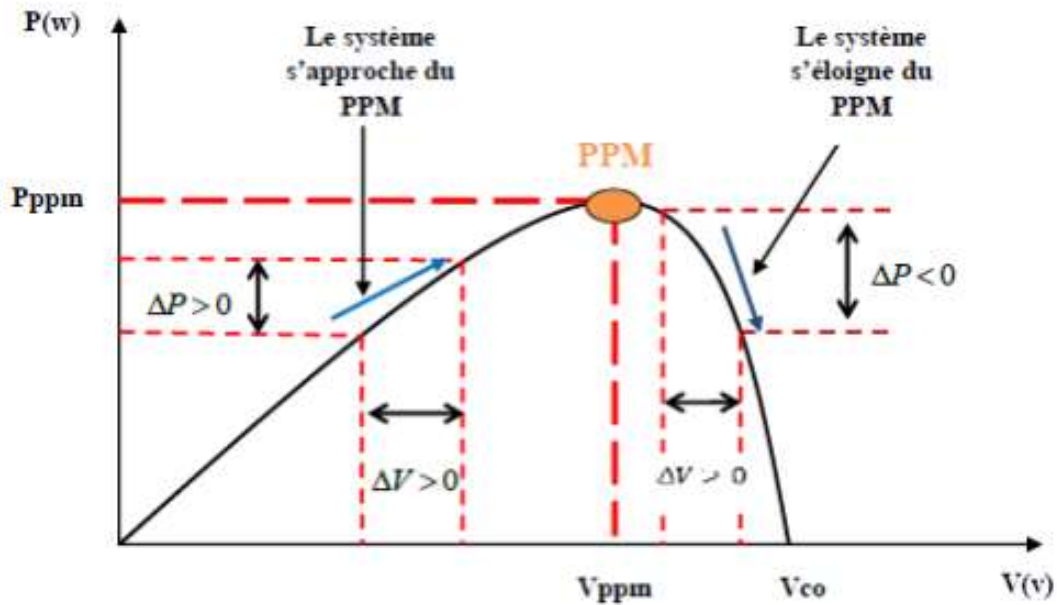


Figure III.1 : Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO. [28]

Comme nous avons dit, Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} (noté ΔP) qui en résulte, Ainsi, comme l'illustre la figure (III.18), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.[29]

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{PV} (V_{PV}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. [29]

1.2. Organigramme de la P&O :

Le schéma suivant représente un résumé de notre algorithme de gestion sous forme d'organigramme.

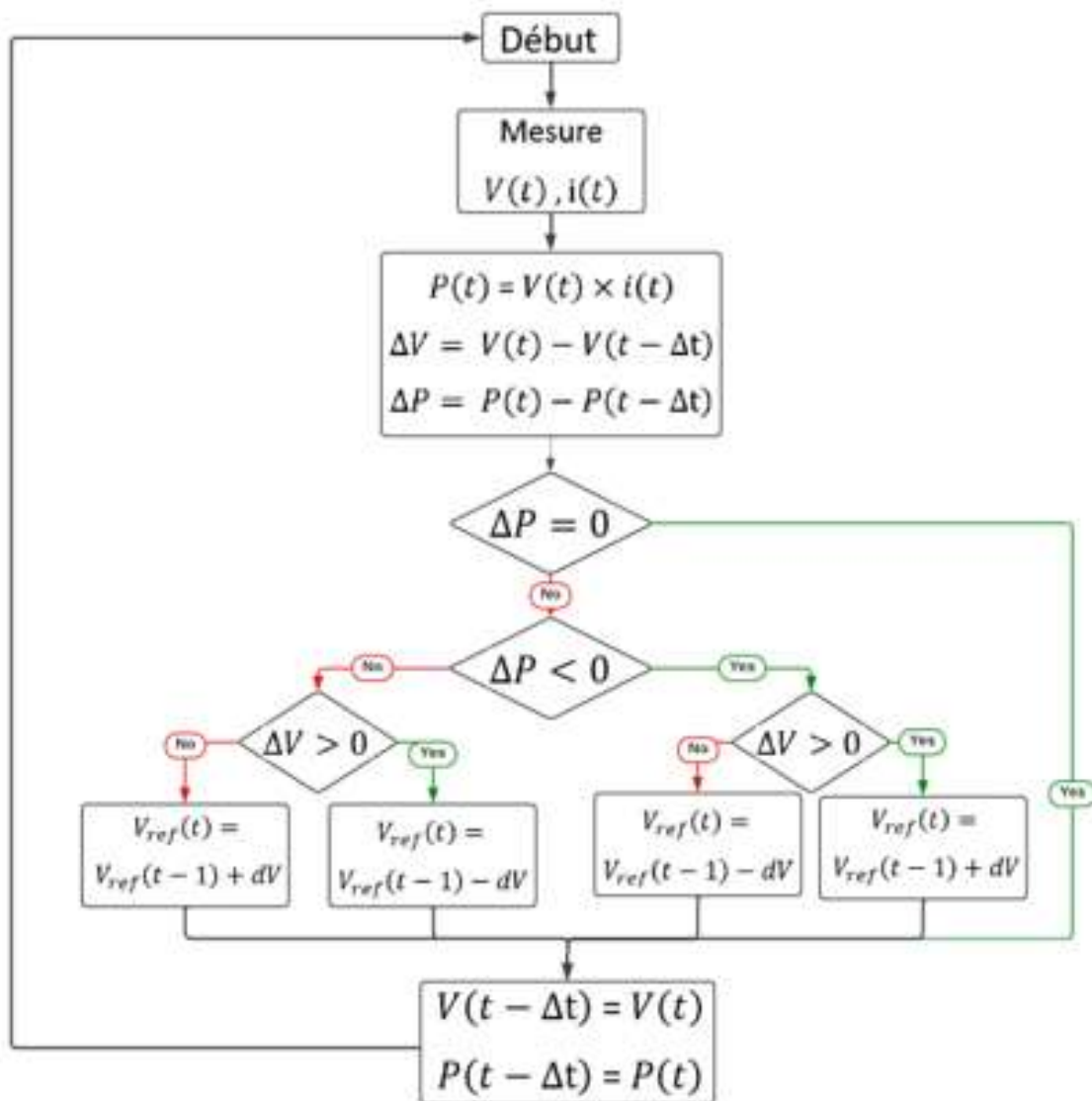


Figure III.2 : Organigramme de la P&O.

Voici une explication détaillée des étapes de l'algorithme (P&O) :

1. Mesurer la tension et le courant du panneau solaire

La première étape consiste à mesurer la tension ($V(t)$) et le courant ($i(t)$) du panneau solaire. Ces valeurs sont ensuite utilisées pour calculer la puissance produite ($P(t)$) par le panneau solaire.

2. Calculer la variation de tension et de puissance

La variation de tension (ΔV) est calculée en soustrayant la tension mesurée à l'instant précédent ($V(t-1)$) de la tension mesurée à l'instant actuel ($V(t)$). La variation de puissance (ΔP) est calculée en soustrayant la puissance mesurée à l'instant précédent ($P(t-1)$) de la puissance mesurée à l'instant actuel ($P(t)$).

3. Vérifier si la puissance a diminué

Si la variation de puissance est négative ($\Delta P < 0$), cela signifie que la perturbation a entraîné une diminution de la puissance produite. Dans ce cas, la perturbation est inversée.

4. Vérifier si la tension a augmenté

Si la variation de tension est positive ($\Delta V > 0$), cela signifie que la perturbation a entraîné une augmentation de la tension. Dans ce cas, il est possible que la puissance ait également augmenté. Si la variation de puissance est également positive ($\Delta P > 0$), cela confirme que la perturbation est dans la bonne direction et elle est maintenue. Si la variation de puissance est négative ($\Delta P < 0$), cela signifie que la puissance a diminué malgré l'augmentation de la tension. Dans ce cas, la perturbation est inversée.

5. Mettre à jour la tension de référence

La tension de référence $V_{ref}(t)$ est utilisée pour contrôler la tension du panneau solaire. Elle est mise à jour en fonction de la variation de puissance et de la variation de tension. Si la puissance a augmenté, la tension de référence est augmentée. Si la puissance a diminué, la tension de référence est diminuée.

6. Répéter les étapes

Les étapes 1 à 5 sont répétées indéfiniment. L'algorithme P&O continue de perturber la tension du panneau solaire et d'observer la puissance produite jusqu'à ce qu'il converge vers le MPP.

2. Les profils d'irradiation et la température :

Pour tester l'efficacité de notre système de gestion, nous allons utiliser des profils réels d'ensoleillement et de température sur deux journées, l'une favorable et l'autre défavorable, en utilisant le site tutiempo.net pour obtenir les données des deux journées à Bejaia.

Site tutiempo.net :

Le site webtutiempo.net fournit des informations météorologiques détaillées pour de nombreuses localités à travers le monde. Le site offre des prévisions météorologiques à court et à long terme, avec des détails sur la température, l'irradiation, les précipitations, le vent, l'humidité, etc.

Les utilisateurs peuvent consulter des informations météorologiques en temps réel, y compris les conditions actuelles et les alertes météo. Pour le site de Bejaia, nous avons réalisé deux courbes représentant l'irradiation et la température sur deux journées spécifiques : une journée défavorable le 02/06/2024 et une journée favorable le 03/06/2024.

- 02/06/2024

Heures	00 :00	01 :00	02 :00	03 :00	04 :00	05 :00	06 :00	07 :00	08 :00
Irradiation	0	0	0	0	0	0	8	63	109
Température	21	20	20	20	19	19	18	19	19

09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00	17 :00	18 :00
175	204	318	341	301	345	370	459	373	219
19	19	19	20	20	20	20	20	21	21

19 :00	20 :00	21 :00	22 :00	23 :00
59	0	0	0	0
20	20	20	20	20

Tableau III.1 : L'irradiation et température pour la journée défavorable.

- 03/06/2024

Heures	00 :00	01 :00	02 :00	03 :00	04 :00	05 :00	06 :00	07 :00	08 :00
Irradiation	0	0	0	0	0	0	28	195	393
Température	19	18	18	18	17	17	17	18	19

09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00	17 :00	18 :00
574	703	822	903	917	876	768	622	441	246
20	21	21	21	21	22	22	22	21	21

19 :00	20 :00	21 :00	22 :00	23 :00
64	0	0	0	0
21	21	20	20	20

Tableau III.1 : L'irradiation et température pour la journée favorable.

Nous avons utilisé l'interpolation de Lagrange pour modéliser l'évolution de l'ensoleillement et de la température au cours du temps, ce qui nous a permis d'obtenir les deux courbes correspondantes. Cette méthode nous a aidés à estimer les variations de ces paramètres clés entre les points de données mesurés, assurant ainsi une représentation plus précise et continue de leur évolution.

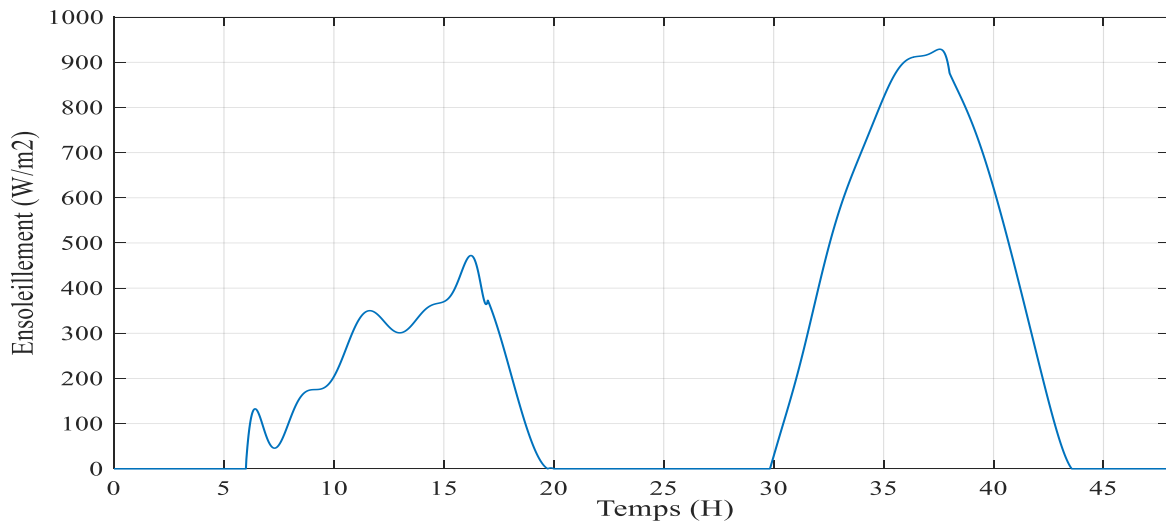


Figure III.3 : Evolution de l'enseillement.

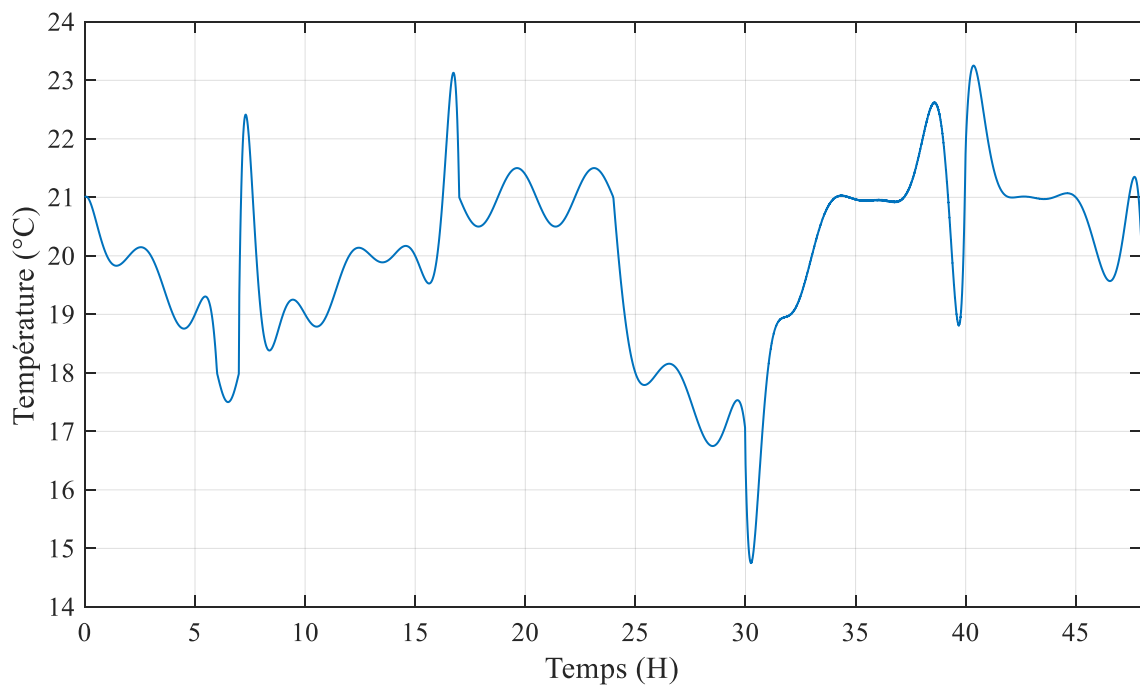


Figure III.4: Evolution de la température.

3. Les profils de production de l'énergie solaire

Le champ photovoltaïque produit une énergie qui se varie selon en fonction des conditions météorologiques et climatiques.

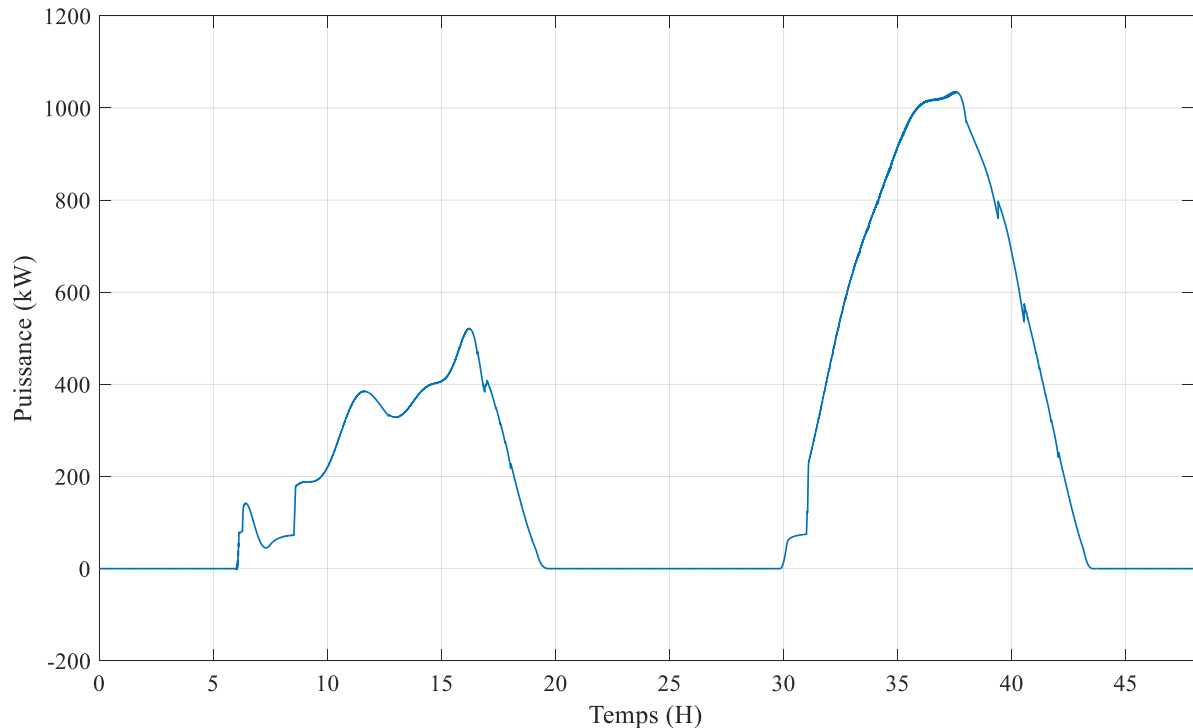


Figure III.5: Puissance délivrée par le champ photovoltaïque

La courbe montre la puissance délivrée par un champ photovoltaïque pendant une période de 48 heures

Les 24 heures suivantes

Cette période correspond à une journée favorable, avec une production d'énergie solaire plus importante. La courbe présente une forme similaire à celle des premières 24 heures, mais avec un pic de puissance plus élevé d'environ 1000 kW et une production d'énergie plus constante tout au long de la journée. La puissance minimale est également plus élevée pendant la nuit.

Les premières 24 heures

Cette période correspond à une journée défavorable avec par une production d'énergie solaire plus faible. La courbe présente une forme en cloche, avec un pic de puissance atteint vers midi d'environ 600 kW, contre 1000 kW pour la journée favorable. La puissance minimale est atteinte pendant la nuit, lorsque l'ensoleillement est absent.

La courbe est plus lisse pour la journée favorable que pour la journée défavorable. Cela est dû au fait que la journée favorable est moins exposée aux changements de conditions météorologiques.

4. Les besoins en énergie :

La consommation d'énergie électrique peut fluctuer tout au long de la journée et des saisons.

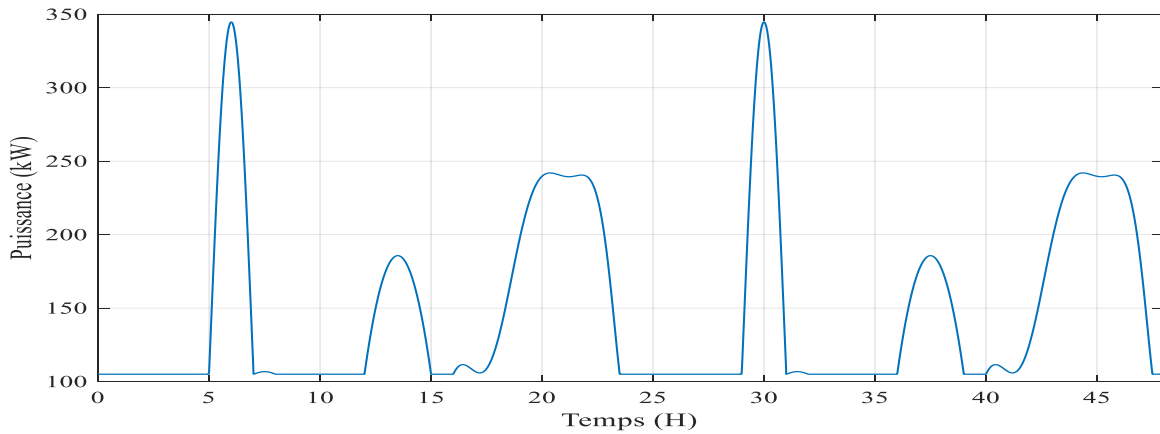


Figure III.6: Puissance demandée par la charge.

La courbe montre que la puissance demandée par la charge varie tout au long de la journée, avec plusieurs pics et creux. Le pic de consommation le plus élevé se situe le matin entre 8h et 10h, et le pic de consommation le plus bas se situe la nuit entre 2h et 4h.

5. Les différents modes possibles

La (figure III.24) représente l'organigramme de gestion de puissance dans notre système photovoltaïque avec stockage hybride

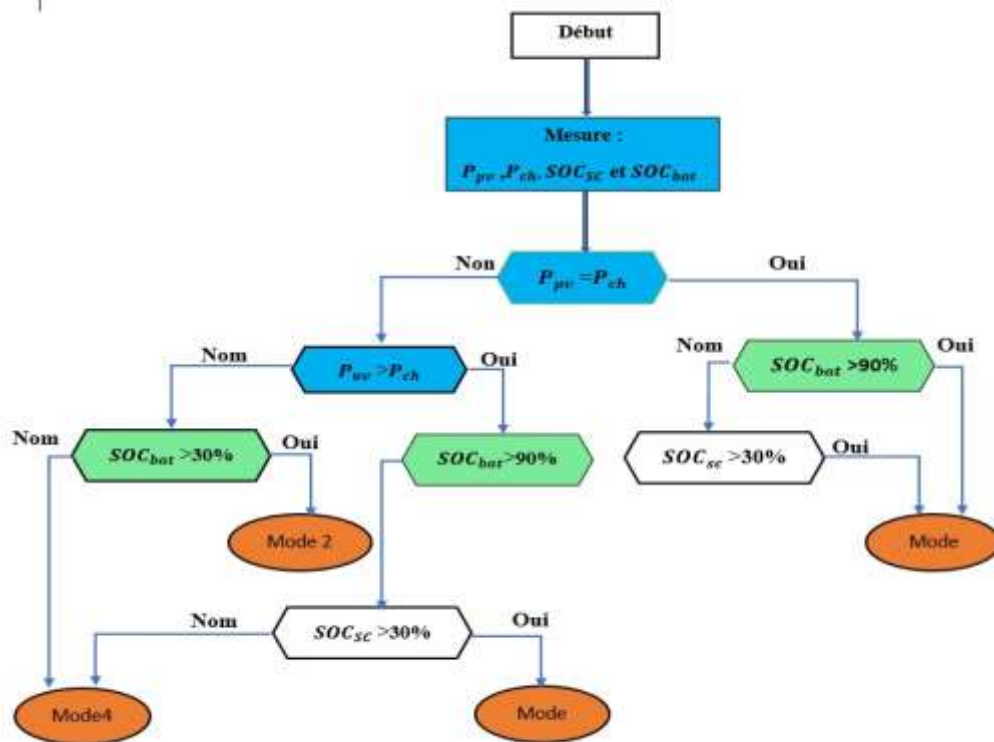


Figure III.7 : Organigramme de système globale

Il y a quatre modes différents :

- **Mode 1**

Lorsque la puissance photovoltaïque est égale à la puissance demandée et que l'état de charge de la batterie ($30\% < SOC_{batt} < 90\%$) ainsi que celui du supercondensateur ($30\% < SOC_{SC} < 90\%$), les deux sont complètement chargés et sont donc déconnectés.

- **Mode 2 :**

Lorsque la puissance solaire disponible est insuffisante pour répondre aux besoins de la charge, et que la batterie est chargée entre ($30\% < SOC_{batt} < 90\%$) ainsi que le supercondensateur ($30\% < SOC_{SC} < 90\%$) dans ce cas le manque sera compensé par la batterie et le super condensateur pour alimenter la charge.

- **Mode 3 :**

Quand la puissance photovoltaïque dépasse la demande de la charge et $30\% < SOC_{batt} < 90\%$, $30\% < SOC_{SC} < 90\%$ (indiquant que les batteries et les super condensateurs sont en cours de charge), la charge sera alors alimentée par l'énergie photovoltaïque générée.

- **Mode 4 :**

Si la puissance photovoltaïque est inférieure à celle de la charge et que l'état de charge des batteries et les super condensateurs est $0\% \leq SOC_{batt} \leq 30\%$, $0\% \leq SOC_{SC} \leq 30\%$ alors la charge est déconnectée et les batteries ainsi que le supercondensateur sont alimentés par la puissance photovoltaïque générée.

5. Simulation du système globale :

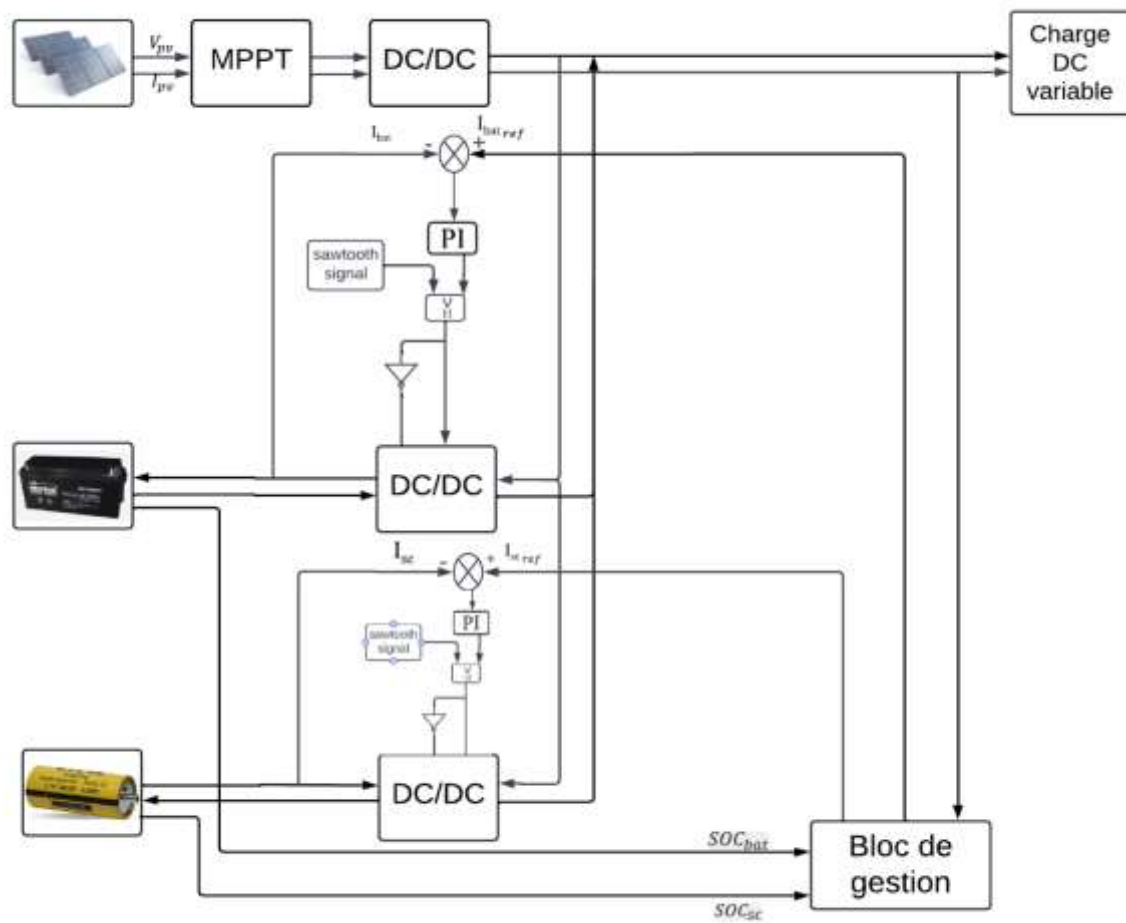


Figure III .8 : Simulation du système global.

5.1. Résultat de simulations

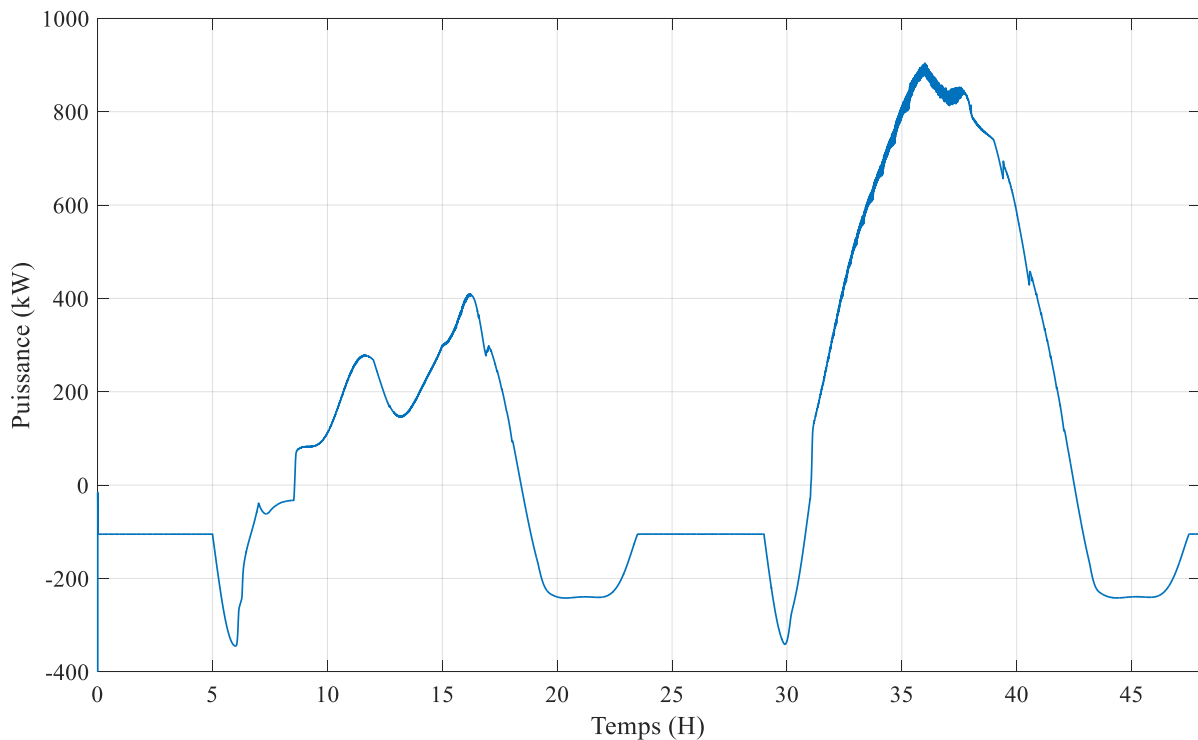


Figure III.9 : Puissance au niveau des batteries.

Commentaire de la courbe de puissance des batteries sur 48 heures

La courbe représente la puissance moyenne des batteries en fonction du temps pendant une période de 48 heures. La courbe est divisée en deux parties de 24 heures chacune : une journée défavorable suivie d'une journée favorable.

Journée défavorable (0h - 24h)

Au cours de la première journée (0h - 24h), la puissance des batteries est principalement négative, ce qui signifie que les batteries sont déchargées. Cela indique que la demande en énergie est supérieure à la production d'énergie. La puissance atteint un pic négatif d'environ -400 kW vers 10 heures, ce qui suggère une forte demande en énergie à ce moment-là.

Journée favorable (24h - 48h)

Au cours de la deuxième journée (24h - 48h), la puissance des batteries est principalement positive, ce qui signifie que les batteries sont chargées. Cela indique que la production d'énergie est supérieure à la demande en énergie. La puissance atteint un pic positif d'environ 800 kW vers 35 heures, ce qui suggère une forte production d'énergie à ce moment-là.

La comparaison entre les deux journées montre que la production d'énergie et la demande en énergie varient considérablement d'un jour à l'autre. La journée défavorable est caractérisée par une forte demande en énergie et une faible production d'énergie, tandis que la

journée favorable est caractérisée par une faible demande en énergie et une forte production d'énergie.

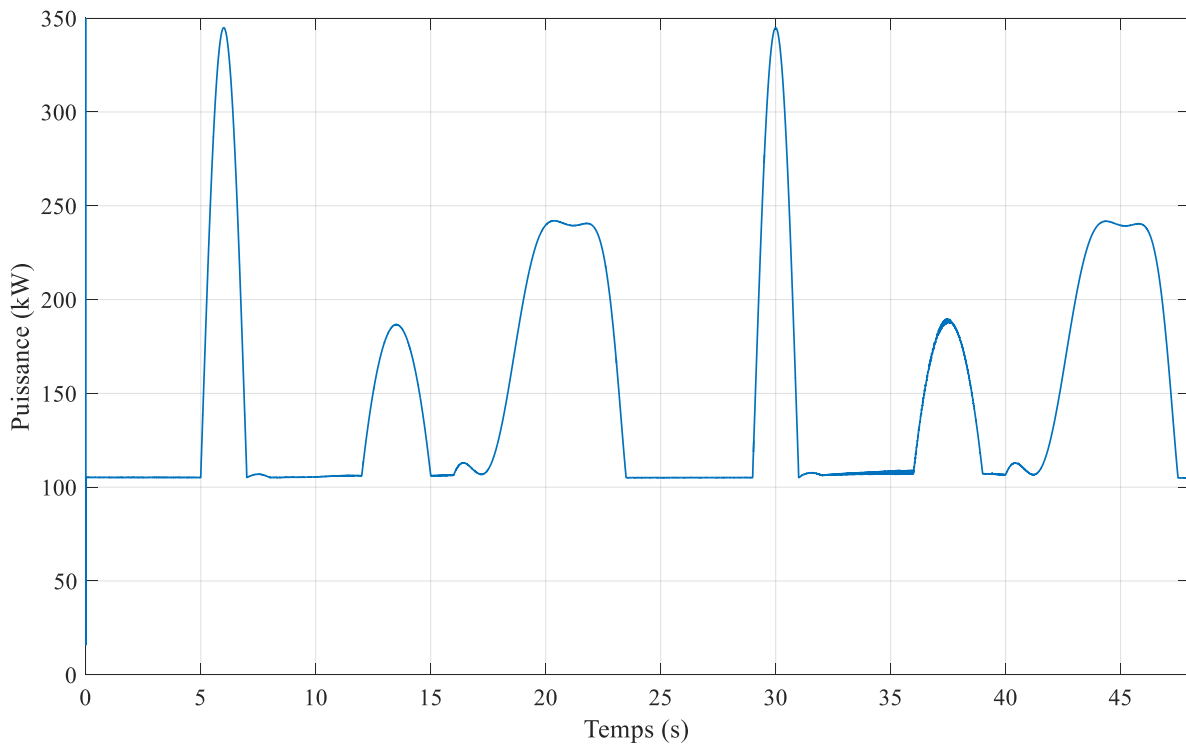


Figure III.10 : Puissance délivrée à la charge.

Commentaire de la courbe de puissance délivrée à la charge

- La courbe représente la puissance délivrée à une charge pendant une période de 48 heures
- La courbe présente une variation cyclique de la puissance délivrée à la charge sur une période de 24 heures.
- La puissance délivrée est plus élevée pendant la journée que pendant la nuit.
- Le pic de puissance délivré est atteint vers 10 heures du matin et le pic de puissance minimale est atteint vers 4 heures du matin.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé la gestion et le contrôle des flux énergétiques dans un système photovoltaïque autonome, en mettant en évidence le rôle du stockage hybride. Nous avons étudié le comportement des batteries et des supercondensateurs en réponse aux variations de l'ensoleillement et de la consommation, à l'aide d'un programme de gestion.

La présence du stockage hybride (batterie et supercondensateurs) permet d'éviter les recharges et les débits excessifs. Les résultats montrent que la batterie alimente la charge pendant les périodes où la production du champ photovoltaïque est nulle ou insuffisante. En

revanche, les supercondensateurs absorbent l'excédent d'énergie produite ou répondent à une forte demande de puissance.

Conclusion générale

Ce mémoire a étudié et modélisé un système multi-source pour l'alimentation d'un micro-réseau, intégrant un système photovoltaïque avec un stockage hybride composé de batteries et de super condensateurs. Afin de pousser notre champ à fonctionner à sa puissance maximale quelles que soient les conditions météorologiques, nous avons utilisé une commande MPPT type P&O, « Méthode de perturbation et d'observation ». Les résultats montrent que cette configuration offre une solution efficace et fiable pour alimenter un village, en combinant les avantages de chaque technologie de stockage. Cette étude confirme la faisabilité et les bénéfices d'un tel système pour les zones rurales, et ouvre la voie à des optimisations futures pour améliorer encore l'efficacité et la durabilité.

Références bibliographiques.

- [1] F. Hami, M. Makhloufi "Étude, commande et simulation du système d'énergie multi source (photovoltaïque, éolienne, diesel) ", Projet de fin d'étude : en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique 2011.
- [2] L. Gabani, A. Righi "Dimensionnement d'un système multi source à énergie renouvelables", mémoire présentée pour l'obtention de diplôme de master, Université de Ghardaïa, 2022.
- [3] T. Larfaoui, M. Zebboudj Mourad "Gestion d'un système multi source (photovoltaïque éolienne) avec stockage par batteries," Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme Master, université de Bejaia, 2021
- [4] K. IDJDARENE, "Systèmes de Conversion de l'Energie Éolienne 1ere année Master" -énergie renouvelable, université de Bejaia,2022.
- [5] S. ZAIRI, S. BOUBIADA, "Étude et Dimensionnement d'une centrale Photovoltaïque" mémoire, Master Énergies Renouvelables, Université de Biskra, 2020
- [6] B. Belhaire, J. Chan, E. Desprez, Hugo Fremont, E. Quarez, C. Vollet, "Énergie solaire photovoltaïque", Projet de Physique P6 STPI/P6/2018 – #35.
- [7] N. Toumi, Mr M. Adjabi, I. Koura, "Énergie solaire photovoltaïque et système photovoltaïque autonome", projet fin d'étude Licence d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar -Annaba 2021.
- [8] O. Zerrouki, "dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque avec batterie pour alimenter un village au sud d'Algérie (ILAMANE)", mémoire Master, Énergie renouvelable, université Blida, septembre 2017.
- [9] K. Mazouz, "Étude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque", mémoire Master en électrotechnique, automatisme industrielle, université de Bejaia, 2012.
- [10] Z. Hamane, H. Hassani, "Étude d'un système hybride PV/PAC/ Batteries", mémoire MASTER, université de Bejaia, 2018.
- [11] A.N. Ghezal, "Étude et Analyse d'une mini centrale hybride PV/Groupe électrogène avec stockage", mémoire MASTER, université de Ghardaïa, 2015.
- [12] Description du système multi sources avec stockage hybride (batteries/super condensateurs),(Chapitre 3), consulté le 15/06/2024 sur :

<https://www.scribd.com/document/625083631/Chapitre-3-Systeme-Multi-Sources-Avec-Stockage-Hybride>.

[13] Air comprimé consulté le 15/06/2024 sur : https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/air_comprime_0.pdf

[14] I. Bounabi, A. Biad, "Gestion de système multi-source (photovoltaïque éolienne) " mémoire Master, université de Bejaia, 2021.

[15] S.A. Derai et A. Kaabeche "Modélisation et dimensionnement d'un système hybride Éolien/ Photovoltaïque autonome" Revue des Énergies Renouvelables Vol. 19 N°2 (2016) 265 – 2761.

[16] A. MEFLAH, "Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister, université de Tlemcen, 2011.

[17] N. Achab, "contribution à l'étude technico-économique et évaluation comportementale de système photovoltaïque électrolyseur PAC et reformeur PAC", mémoire de Magister, électrotechnique université d'Oran, 2012.

[18] S. Bouazza, H. Bouchnafa, "Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque ", Mémoire de DES, Université de Tlemcen, Juin 2001.

[19] M. Rachid, " Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah ", Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2005.

[20] Les facteurs qui influencent la performance des panneaux solaires (température, irradiances, encrassement, etc.) - RJ HOME SOLAR (rj-home-solar.fr) , consulté le 15/06/2024.

[21] Y. Tarfaya, "Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV", Mémoire de Master, Sciences de l'ingénieur Électrotechnique, Université Annaba, 2019.

[22] Y. BOKHARI, "Un Système Hybride PV - PAC - Sc Pour Une Application Embarquée", mémoire de Master, Université de Biskra, 2019.

[23] H. Dahmani, M. BOUZAIA "Étude et dimensionnement d'un système photovoltaïque dédié à une habitation", mémoire de Master professionnel, université de Tizi-Ouzou, électrotechnique industrielle, 2017.

[24] C.E. Mokhnachi, "Étude d'une installation de panneaux solaires photovoltaïques pour les besoins domestiques", mémoire de Master, génie mécanique, université Annaba, 2014.

[26] Y. Benmeziane, Z. Bournane, S. Nasri, W. Ben Hamida, "Étude et simulation d'un hacheur (BUCK-BOOST)", projet fin étude License université Annaba 2021.

[27] K. Ankik, H. Benacer "Evaluation et contrôle d'énergie d'un système hybride", projet de cycle en vue d'obtention Master, Université de Bejaia 2014.

[28] <https://univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/16924/1/Combinaison.pdf>

[29] <https://dSPACE.univ-medea.dz/bitstream/123456789/4235/1/M117139.pdf>