

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme

De Master en Automatique

Intitulé

**Commande d'un Système
Photovoltaïque en mode Isolé et en
mode Connecté au Réseau**

Réalisé par :

HAMDANI Oussama

LARABA Mohammed Tahar

Proposé et dirigé par :

Pr EM.BERKOUK

Promotion : Juin 2013

Ecole Nationale Polytechnique, 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger.

تتأثر الطاقة المولدة من وحدة نمطية الضوئية من شدة أشعة الشمس ودرجة الحرارة من الخلايا، ولكن أيضا من قبل الحمل. لتحقيق أقصى قدر من الأداء لنظم الطاقة المتجددة فمن الضروري اعتماد خوارزمية MPPT لمواصلة نقطة الطاقة القصوى من مصدر الدخل. في هذا العمل، ونحن مهتمون في نمذجة مختلف مكونات سلسلة PV مع لوحة الكهروضوئية، المحوّل مستمر-مستمر، الباص سي، المموج ذو الطورين ونظام التخزين. نحن ثم تمريرها إلى دراسة وضعين من تشغيل النظام: أولا، وضع معزولة، حيث ناقشنا إدارة الطاقة بين الإنتاج PV و بطارية والمكثفات الفائقة. في وضع شبكية، أكد لي توقيت التوترات مع PLL، وأنشئت تنظيم التيارات والفولتية لضمان تشغيل نظام سليم. وقد وضعت لوائح وأوامر من البطاريات والمكثفات الفائقة التي كتبها موضة والطريقة المباشرة يابونوف وانزلاق. وأخيرا، وضعنا خوارزمية لإدارة الطاقة لنظام الضوئية العالمية في بيئة MATLAB.

الكلمات المفتاحية : الكهروضوئي، MPPT، نظام تخزين الطاقة، المحوّل مستمر-مستمر، محول التيار المستمر، المموج ذو الطورين، يابونوف وطريقة الانزلاق، الشبكة الكهربائية، التزامنية، PLL، دم م، دم س، المكثفات الفائقة، التنظيمات

Résumé

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire et la température des cellules, mais aussi par la charge. Afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable il est nécessaire d'adopter un algorithme MPPT afin de poursuivre le point de puissance maximale de la source d'entrée. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents constituants de la chaîne photovoltaïque comportant, le panneau PV, le hacheur Buck-Boost, le bus continu, l'onduleur à deux niveaux et le système de stockage. Nous sommes passés ensuite, à l'étude des deux modes de fonctionnement du système; d'abord, le mode isolé, où on a abordé la gestion de l'énergie entre production PV et batterie+supercondensateur. En mode connecté au réseau, on a assuré la synchronisation des tensions grâce à la PLL, et des régulations de courants et de tensions qui ont été établis afin de garantir un fonctionnement correct du système. Les régulations ainsi que les commandes des convertisseurs liés aux batteries et aux supercondensateurs ont été développées par mode Glissant et par la méthode directe de LYAPUNOV. Finalement, nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie pour le système photovoltaïque global sous l'environnement MATLAB.

Mots clés : Photovoltaïque, MPPT, stockage, hacheur Buck-Boost, bus continu, onduleur à deux niveaux, réseau, synchronisation, PLL, régulation, Mode glissant, LYAPUNOV, FDN, FDP, gestion.

Abstract

The power generated by a photovoltaic module is influenced by the intensity of sunlight and the temperature of the cells, but also by the load. To maximize the performance of renewable energy systems it is necessary to adopt a MPPT algorithm to continue the maximum power point of the input source. In this work, we are interested in modeling the various components of the PV chain with the PV panel, the chopper Buck-Boost, DC bus, the two-level inverter and storage system. We went then to the study of two modes of operation of the system: first, the isolated mode, where we discussed the energy management between PV generation and battery + Supercapacitor. In networked mode, we assured the timing of voltages with the PLL, and regulation of currents and voltages that have been established to ensure proper system operation. Regulations and orders related to converters batteries and supercapacitors have been developed by Sliding mode and direct method LYAPUNOV. Finally, we developed an algorithm for power management for the global photovoltaic system in the MATLAB environment.

Key words: Photovoltaic, MPPT, storage, Buck-Boost converter, DC-Link, two level inverter, network, synchronization, PLL, regulation, SMC, LYAPUNOV, FDP, FDN, Battery, Supercapacitor, managing.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord *Allah* qui nous a guidés sur la bonne voie et nous a aidés à surmonter les difficultés.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur *Pr EM.BERKOUK* pour avoir proposé ce sujet, ses précieux conseils et son aide tout au long de notre travail.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin, tous nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Nous dédions ce travail à :

Nos très chers parents et grands parents

A nos familles

A tous nos amis

A toute la promotion 2013

A tous ceux qui ont partagé nos joies et peines

Mohammed Tahar

Oussama

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction Générale | 1 |
| | |
| Chapitre I : Gestion d'énergie du système globale | |
| | |
| I.1. Objectifs de la gestion d'énergie | 4 |
| I.1.1. Commande du générateur photovoltaïque | 4 |
| I.1.2. Commande du système de stockage hybride (batterie-supercondensateur)..... | 4 |
| I.1.3. Coté onduleur | 6 |
| I.1.4. Coté charge | 6 |
| I.2. Description de la gestion du système photovoltaïque..... | 6 |
| I.2.2. Mode puissances limitées M2..... | 8 |
| I.2.4. Mode très faible état de charge M4 | 8 |
| I.2.5. Mode sollicitation du réseau électrique M5..... | 8 |
| I.2.6. Mode état de charge maximale M6 | 8 |
| I.3. L'algorithme de la gestion du système photovoltaïque | 8 |
| I.3.1. Mode puissance photovoltaïque limitée | 8 |
| I.3.2. Mode isolé | 10 |
| I.3.2.b. Mode état de charge maximale M8 | 10 |
| I.3.3. Mode connecté au réseau..... | 13 |
| I.4. Résultats de simulation et interprétations | 16 |
| I.5. Conclusion..... | 20 |
| | |
| Conclusion générale et Perspectives | 21 |
| Annexes | 22 |
| Bibliographie | 23 |

Introduction Générale

La demande croissante en énergie et l'appauvrissement des énergies fossiles impliquent de trouver de nouvelles sources d'énergie propres et durables. Les énergies renouvelables, notamment d'origine solaire et éolienne, pourraient répondre à cette attente. Des systèmes permettant la conversion de l'énergie solaire ou éolienne en énergie électrique utilisable prennent une part de plus en plus grande même si elle reste mineure par rapport à l'électricité produite par les centrales thermiques et nucléaires. Les systèmes de conversion sont divers, ils peuvent être reliés au réseau, ou bien alimenter un dispositif sur un site isolé.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant électrique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et en parallèle forme un générateur photovoltaïque.

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant des étages d'adaptation en entrée assurant la recherche du PPM. En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur.

Les sources d'énergies renouvelables ont l'avantage d'être gratuites et inépuisables mais présentent une intermittence qu'il est nécessaire de pallier avec un dispositif de stockage de l'énergie électrique, qui doit également être adapté à la restitution de l'énergie électrique à travers la charge utilisée.

Le stockage de l'énergie photovoltaïque est principalement assuré par les batteries, même si d'autres moyens sont envisageables. Les batteries ont une énergie massique élevée. Mais elles nécessitent un entretien assez contraignant avec une durée de vie relativement faible (compter 5 à 10 ans) et surtout ne sont pas toujours adaptées à l'usage effectué. Ainsi, des applications photovoltaïques nécessitant des pics de puissance ou la régulation d'une puissance électrique ne peuvent pas être envisagées par de simples batteries ayant une dynamique trop lente. Les appels de puissance importants peuvent être obtenus par la nouvelle génération des supercondensateurs, de densités de puissance plus élevées, apparue dans les années 90.

Dans le début de ce manuscrit, les modélisations énergétiques des différents éléments composant le système photovoltaïque ainsi que le système de stockage seront présentés. La complexité des modèles utilisés doit rester acceptable de façon à ne pas rallonger de manière excessive le temps de résolution du problème et réaliser un bon compromis entre simplicité et performance.

Introduction Générale

Dans le second chapitre, nous passerons au développement de l'algorithme de gestion d'énergie avec comme objectif de satisfaire la charge. Afin de tester les performances de la gestion du système photovoltaïque global, une simulation numérique sous l'environnement MATLAB sera accomplie.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

Chapitre I
**Gestion d'énergie du système
globale**

Chapitre I : Structure du système photovoltaïque et objectifs de la gestion d'énergie

I.1. Objectifs de la gestion d'énergie

La structure du système photovoltaïque et les objectifs de la gestion d'énergie sont décrits dans les sous-sections suivantes [27][49][46][47]:

I.1.1. Commande du générateur photovoltaïque

Le hacheur buck-boost permet de contrôler le générateur PV en utilisant soit l'algorithme MPPT, ou bien le mode puissance limitée. Ce dernier permet de limiter la puissance produite dans les cas suivants :

- Le système PV produit une puissance supérieure à celle supportée par les convertisseurs de puissance. Cela en cas d'une faible température, ou bien d'une irradiation solaire très importante dans certains jours d'été.
- Le système d'énergie photovoltaïque satisfait la charge et le système de stockage (batteries supercondensateurs) est complètement chargé. Dans ce cas, on fournit de l'énergie au réseau, mais ce dernier peut imposer une valeur maximale de puissance à ne pas dépasser. Ainsi, une limitation de la puissance produite par les générateurs PV est nécessaire.

I.1.2. Commande du système de stockage hybride (batterie-supercondensateur)

Le système de stockage est très important pour avoir une puissance fournie plus lisse, et une maximisation d'utilisation des énergies d'origines renouvelables. Ce qui minimise le recours à la puissance issue du réseau électrique.

Dans notre cas, nous avons utilisé un système de stockage hybride, dont la batterie permet le stockage à long terme et le supercondensateur agit dans les transitoires de la puissance de stockage demandée. Et cela, afin d'améliorer la dynamique du stockage.

Pour chaque type de stockage, nous avons utilisé un convertisseur DC/DC, qui dans le cas de la décharge travaille comme hacheur élévateur de tension, et pour le mode chargement il devient hacheur abaisseur de tension. Ce convertisseur est contrôlé pour assurer le courant de stockage requis.

Le système de supervision fournit la puissance référence de stockage, qui passe par la suite à travers un filtre passe-bas vers les batteries, et la partie transitoire est reçue par les supercondensateurs. Par convention, si la puissance de stockage de référence est positive ça veut dire qu'on est dans le mode chargement, et si elle est négative, on est dans le mode décharge.

Les batteries ou les supercondensateurs sont ouverts si la puissance de référence est nulle. Pour la préservation de la durée de vie des éléments de stockage la gestion des opérations charge/décharge est très importante. Pour cela, l'état de charge SOC des batteries ou des supercondensateurs ne doit pas dépasser (90%) en charge, et ne doit pas être inférieure à (25%) en décharge, comme le montre les équations (II.1) et (II.2) pour le mode connecté au réseau, et les équations (II.3) et (II.4) pour le mode isolé. Sinon, l'algorithme de gestion va immédiatement déconnecter l'élément de stockage correspondant. Deux commutateurs contrôlés par les états de charges et la puissance de référence envoyée vers les batteries ou vers les supercondensateurs permettent de désactiver les éléments de stockage, comme l'illustre la Figure (II.1) [11][27][40].

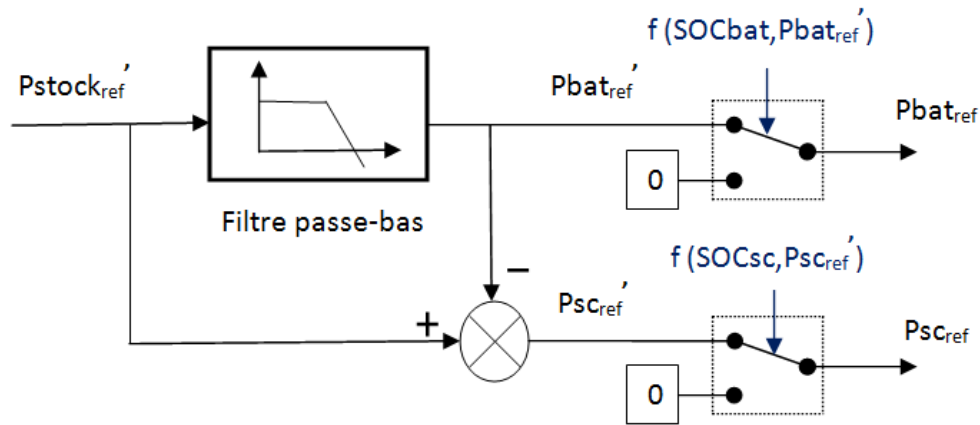


Figure I.1 : Elaboration des consignes du stockage hybride

$$P_{BATref} = \begin{cases} 0 & \text{si} & \begin{cases} P'_{BATref} > 0 \text{ et } SOC_{bat} > 90\% \\ P'_{BATref} < 0 \text{ et } SOC_{bat} < 25\% \end{cases} \\ P'_{BATref} & \text{si} & \begin{cases} P'_{BATref} > 0 \text{ et } SOC_{bat} < 90\% \\ P'_{BATref} < 0 \text{ et } SOC_{bat} > 25\% \end{cases} \end{cases} \quad (I.1)$$

$$P_{SCref} = \begin{cases} 0 & \text{si} & \begin{cases} P'_{SCref} > 0 \text{ et } SOC_{sc} > 90\% \\ P'_{SCref} < 0 \text{ et } SOC_{sc} < 25\% \end{cases} \\ P'_{SCref} & \text{si} & \begin{cases} P'_{SCref} > 0 \text{ et } SOC_{sc} < 90\% \\ P'_{SCref} < 0 \text{ et } SOC_{sc} > 25\% \end{cases} \end{cases} \quad (I.2)$$

$$AnnBat = \begin{cases} 0 & \text{si} & \begin{cases} V_{dc} = V_{dcref} \text{ et } SOC_{bat} < 90\% \\ V_{dc} < V_{dcref} \text{ et } SOC_{bat} > 25\% \end{cases} \\ 1 & \text{si} & \begin{cases} V_{dc} = V_{dcref} \text{ et } SOC_{bat} > 90\% \\ V_{dc} < V_{dcref} \text{ et } SOC_{bat} < 25\% \end{cases} \end{cases} \quad (I.3)$$

$$AnnSC = \begin{cases} 0 & \text{si} & \begin{cases} V_{dc} = V_{dcref} \text{ et } SOC_{sc} < 90\% \\ V_{dc} < V_{dcref} \text{ et } SOC_{sc} > 25\% \end{cases} \\ 1 & \text{si} & \begin{cases} V_{dc} = V_{dcref} \text{ et } SOC_{sc} > 90\% \\ V_{dc} < V_{dcref} \text{ et } SOC_{sc} < 25\% \end{cases} \end{cases} \quad (I.4)$$

I.1.3. Coté onduleur

L'onduleur triphasé est commandé par la méthode de la tension orientée VOC avec la modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoïdale. Le système photovoltaïque connecté au bus DC génère un courant I_{pv} , par conséquent le but du contrôle de l'onduleur est de garder une tension de bus continue V_{dc} constante, et aussi d'asservir la puissance réactive pour qu'elle suit la référence nulle, pour avoir un facteur de puissance unitaire.

I.1.4. Coté charge

Dans notre étude, nous avons cherché à favoriser l'utilisation des énergies renouvelables et à minimiser le besoin de recourir au réseau électrique. Dans ce contexte, nous avons considéré qu'une gestion de la charge est importante dans certains scénarios de fonctionnement où le système photovoltaïque ne peut pas satisfaire la charge totale, et doit par la suite solliciter le réseau. Pour cela, nous avons attribué pour chaque charge une priorité selon l'importance de cette dernière.

Ces charges peuvent être commutées par le système de gestion, selon l'état de charge SOC des batteries. Les détails de la gestion de charge sont discutés par la suite dans la section suivante. Les charges sont modulées comme des résistances contrôlables leurs valeurs sont déterminées selon le profil de charge.

I.2. Description de la gestion du système photovoltaïque

L'algorithme de gestion représente un contrôle classique du type UPDOWN, qui supervise les différents modes d'opérations, ainsi que les flux énergétiques à travers les composants du système photovoltaïque. Ces derniers sont asservis par les contrôleurs locaux, qui eux même sont sous le contrôle du système de gestion globale. Dans l'objectif d'assurer un fonctionnement optimal, l'architecture générale de supervision est décrite dans la figure I.2 [17][21][22][41].

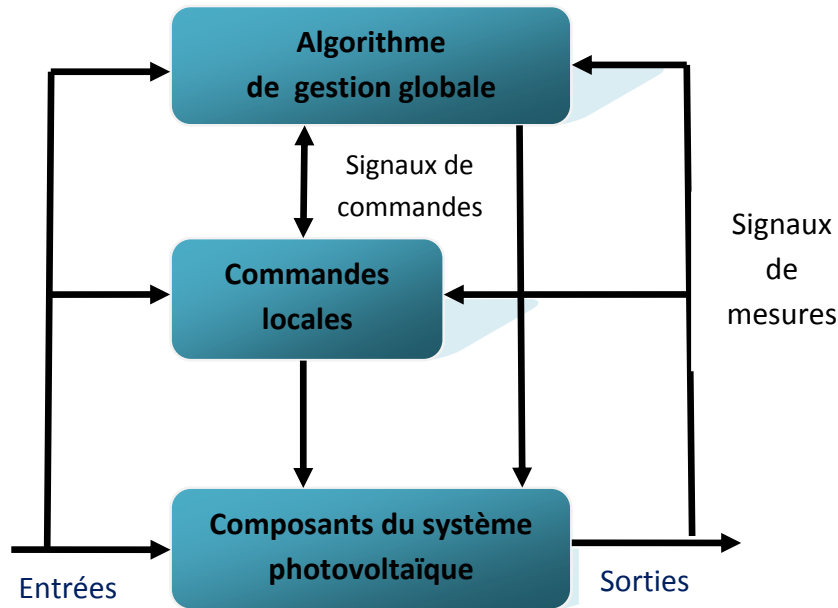


Figure I.2 : Architecture générale de la supervision du système photovoltaïque.

La caractérisation des modes de fonctionnement du système photovoltaïque se base sur des contraintes spécifiques. L'algorithme proposé de gestion des flux énergétiques a comme objectif principal de satisfaire la demande, tout en gardant un équilibre entre les différents composants du système photovoltaïque dans tous les scénarios de fonctionnement possibles, et cela en se basant sur les directives suivantes :

- Dans le cas où les batteries et les supercondensateurs sont complètement chargés, le surplus d'énergie produit par le système photovoltaïque est transféré vers le réseau. Si le réseau impose une limite, la puissance produite par le générateur photovoltaïque doit être limitée.
- Seule la charge avec la priorité la plus importante qui peut être soutenue par le réseau, en cas où le système photovoltaïque ne permet pas de satisfaire la demande avec la priorité la plus importante. Les autres charges sont déconnectées par ordre de priorité croissant, cela permet de maintenir une certaine indépendance vis-à-vis du réseau, et donc de réduire le coût globale.
- L'algorithme de gestion doit assurer une transition lisse entre les différents modes du fonctionnement.
- La durée de vie et la disponibilité des batteries et des supercondensateurs doivent être préservées, par une gestion adéquate des opérations charge/décharge du système de stockage hybride.

Les modes d'opération du système d'énergie photovoltaïque sont détaillés comme suit :

I.2.1. Mode de fonctionnement normale M1

Ce mode apparaît, quand l'état de charge des batteries SOC est entre 50% et 90%, dans ce cas le générateur PV produit de l'énergie électrique suivant les conditions climatiques. Le système photovoltaïque satisfait la demande et toutes les charges sont connectées.

I.2.2. Mode puissances limitées M2

Dans ce cas le surplus d'énergie produit par le système photovoltaïque, qui est envoyé vers le réseau électrique dépasse le seuil imposé par ce dernier. Comme les batteries et les supercondensateurs sont complètement chargés (SOC=90%), il est nécessaire de limiter la puissance produite par les générateurs PV.

I.2.3. Mode faible état de charge M3

Ce mode est sollicité quand l'état de charge des batteries chute en dessous de 50%, mais reste supérieure à 35%. Pour éviter une décharge rapide des batteries et par la suite la nécessité de solliciter le réseau électrique, l'algorithme de supervision va commuter en fermeture la charge avec la plus faible priorité (charge P3).

I.2.4. Mode très faible état de charge M4

Si le SOC des batteries décroît à une valeur inférieure à 35%, mais demeure supérieure à 25%, les batteries peuvent toujours fonctionner en mode décharge. Mais pour prolonger l'indépendance du système photovoltaïque vis-à-vis du réseau électrique, la charge avec la seconde priorité (charge P2) est commutée en fermeture, elle est ajoutée donc à la charge P3.

I.2.5. Mode sollicitation du réseau électrique M5

Si les batteries continuent à se décharger ($P_{BATref} < 0$), et le SOC des batteries diminue au-dessous de 25%, ça veut dire que le système photovoltaïque n'est pas capable de satisfaire la charge principale avec la priorité P1. Dans ce cas, nous faisons recours au réseau électrique qui joue le rôle d'une source de soutien. Les batteries et les supercondensateurs sont déconnectés pour éviter les décharges profondes.

I.2.6 Mode état de charge maximale M6

Le SOC des batteries dépasse la valeur de 90%, dans cette situation le chargement des batteries n'est pas autorisé. S'il y a un surplus d'énergie et que les supercondensateurs sont complètement chargés, il est envoyé vers le réseau électrique et les batteries ainsi que les supercondensateurs seront déconnectés. Si la puissance fournit au réseau est limitée par une valeur maximale, nous basculons vers le mode puissance limitée.

I.3. L'algorithme de la gestion du système photovoltaïque

I.3.1. Mode puissance photovoltaïque limitée

Il existe plusieurs cas où le gestionnaire d'énergie a besoin de limiter la puissance PV. Comme dans le cas où cette puissance dépasse la valeur maximale admissible par les convertisseurs de puissance. Ou bien,

quand la puissance demandée par le réseau est limitée, ce qui nécessite une réduction de la puissance produite.

Cette solution permet d'éviter l'arrêt complet de la production, ou bien le besoin d'utiliser des résistances supplémentaires. Une boucle de régulation de tension photovoltaïque à base de régulateur par mode glissant et par la méthode direct de LYAPUNOV est utilisée pour réduire la puissance produite (voir figure I.3). Le mode limitation est actionné par le système de gestion d'énergie qui impose une limite de production P_{pv_limite} . Dans le cas où la puissance produite reste toujours inférieure à cette dernière limite, le générateur PV continue à fonctionner en mode MPPT.

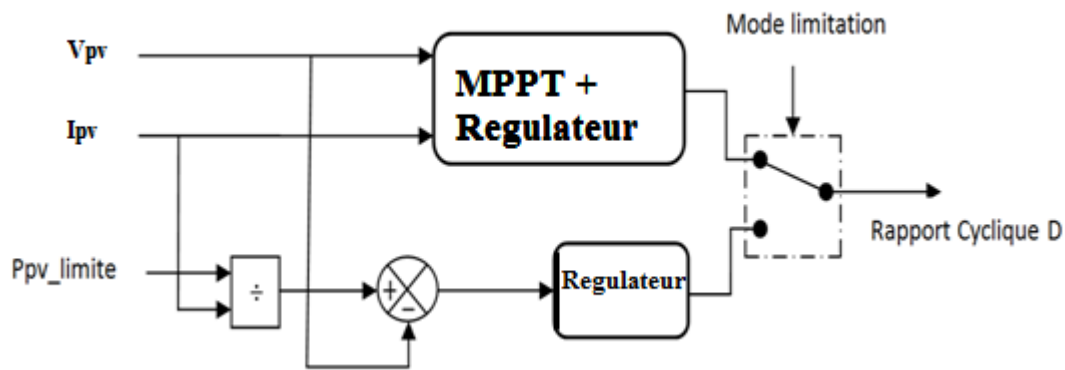


Figure I.3 : Utilisation du mode puissance limitée

• Résultats de simulation et interprétations

Nous allons utiliser un profil d'irradiation solaire fixe. Le générateur PV a une puissance de 850W, et la tension du bus continu est supposée constante à 400V. Nous appliquons le mode limitation de puissance entre les instants 0.15s et 0.35s avec une puissance maximale imposée de 300W.

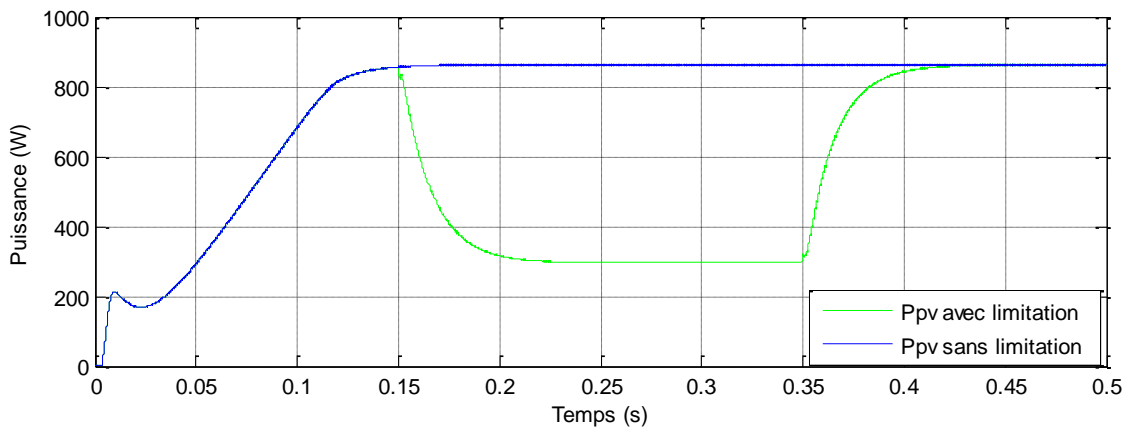


Figure I.4 : Puissance PV en mode puissance limitée

Comme le montre la figure I.4, la technique de limitation de puissance PV garde bien une puissance constante de 300W entre 0.15s et 0.35s. Le passage entre le mode MPPT vers le mode puissance limitée est caractérisé par un très petit retard de réponse du régulateur par MG (ou Lyapunov), qui est vraiment faible, mais qui va induire des pertes de puissance.

I.3.2. Mode isolé

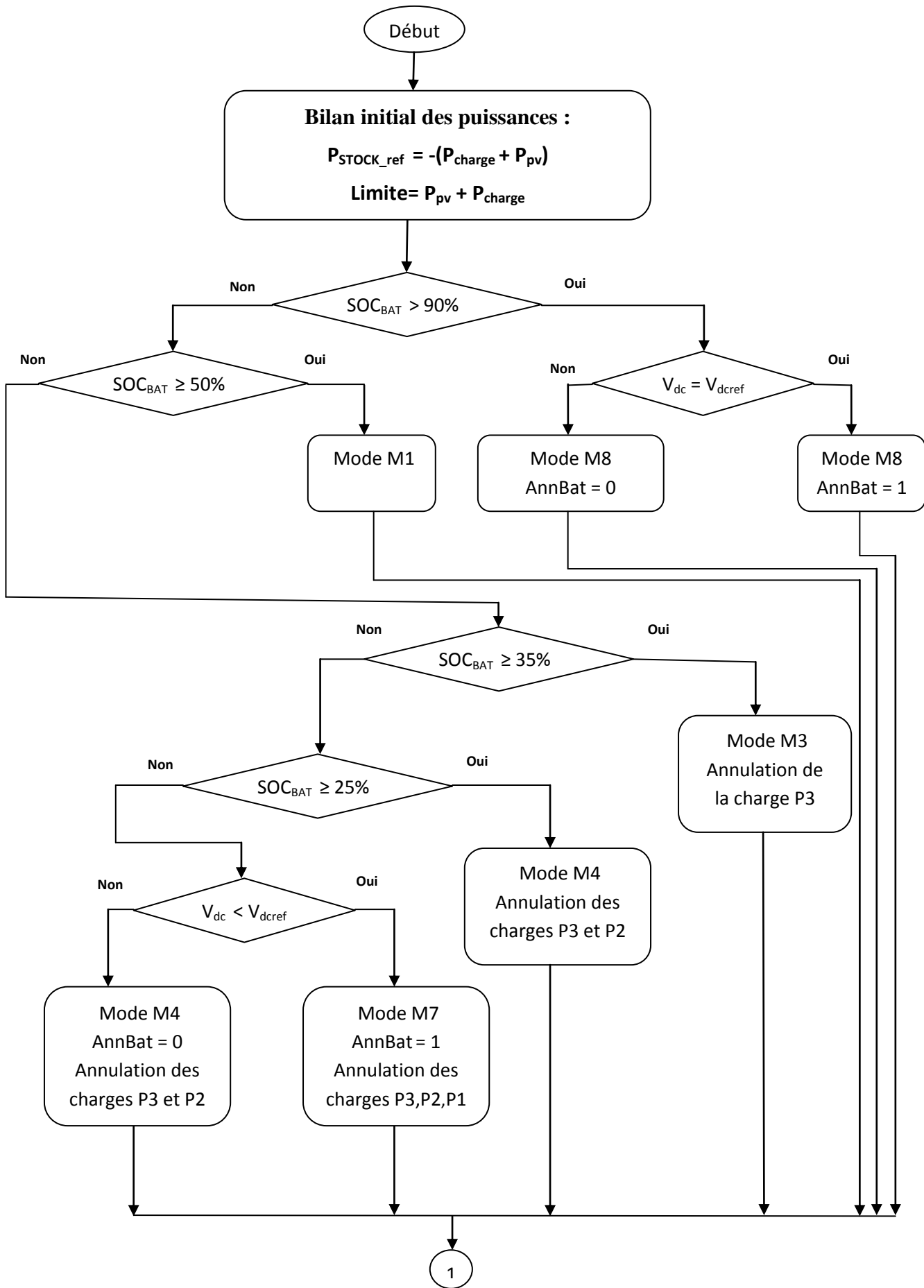
La figure I.5 illustre l'algorithme proposé pour la gestion d'énergie en mode isolé, qui tient compte des différents modes de fonctionnement du système photovoltaïque. On y trouve les modes cités au-dessous, sachant que dans cette partie il n'y a pas de réseau, donc on changera le mode M5 qui est le mode sollicitation de réseau électrique car on devra déconnecter la charge principale avec les deux autres charges. Tout ceci est expliqué clairement au-dessous.

I.3.2.a. Mode déconnexion de la charge principale M7

Si les batteries continuent à se décharger ($V_{dc} < V_{dcref}$), et le SOC des batteries diminue au-dessous de 25%, ça veut dire que le système photovoltaïque n'est pas capable de satisfaire la charge principale avec la priorité P1. Dans ce cas, nous devons déconnecter la charge principale P1. Les batteries et les supercondensateurs sont déconnectés pour éviter les décharges profondes.

I.3.2.b. Mode état de charge maximale M8

Le SOC des batteries dépasse la valeur de 90%, dans cette situation le chargement des batteries n'est pas autorisé. S'il y a un surplus d'énergie et que les supercondensateurs sont complètement chargés, et les batteries ainsi que les supercondensateurs sont déconnectés, nous basculons vers le mode puissance limitée.



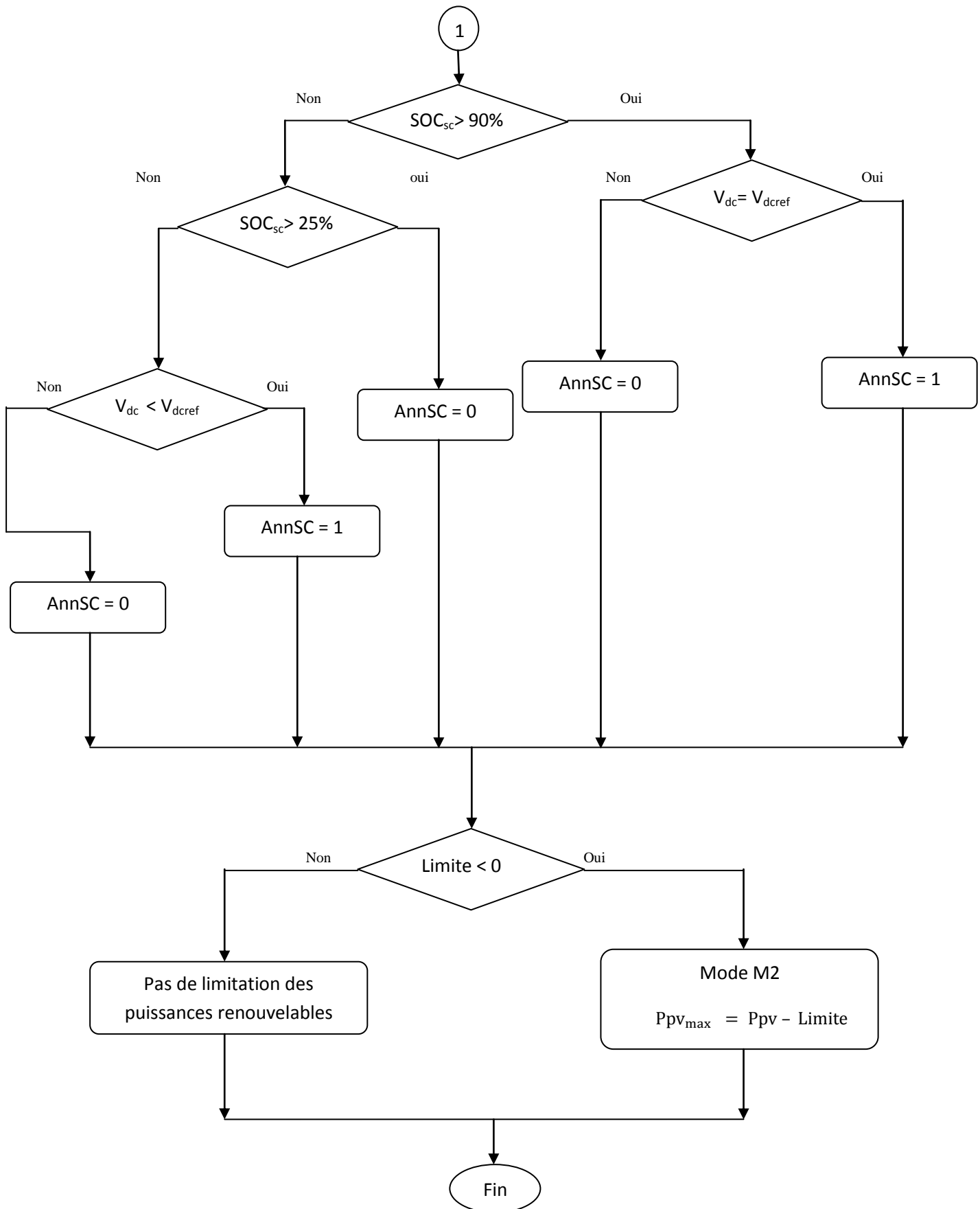


Figure I.5 : Algorithme de gestion des flux énergétiques du système photovoltaïque en mode isolé

I.3.3. Mode connecté au réseau

La figure I.7 illustre l'algorithme proposé pour la gestion d'énergie en mode connecté au réseau, qui tient compte des différents modes de fonctionnement du système photovoltaïque.

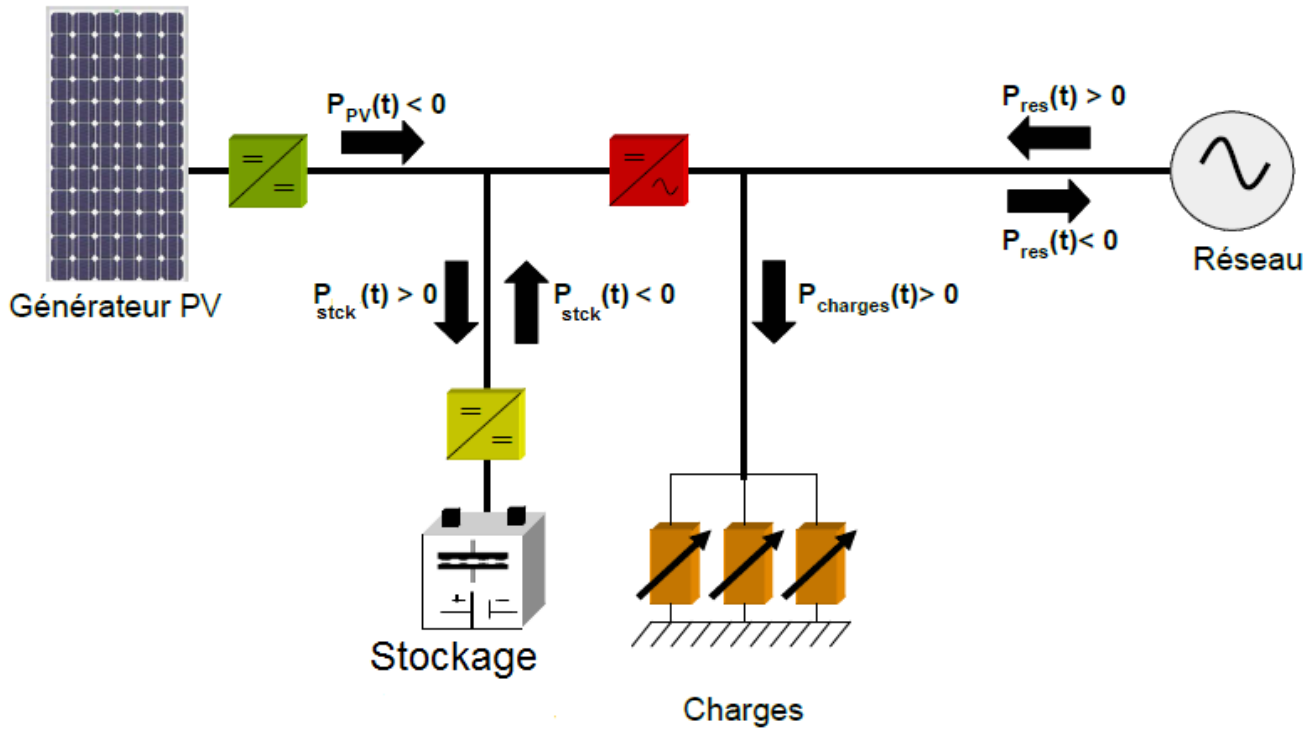
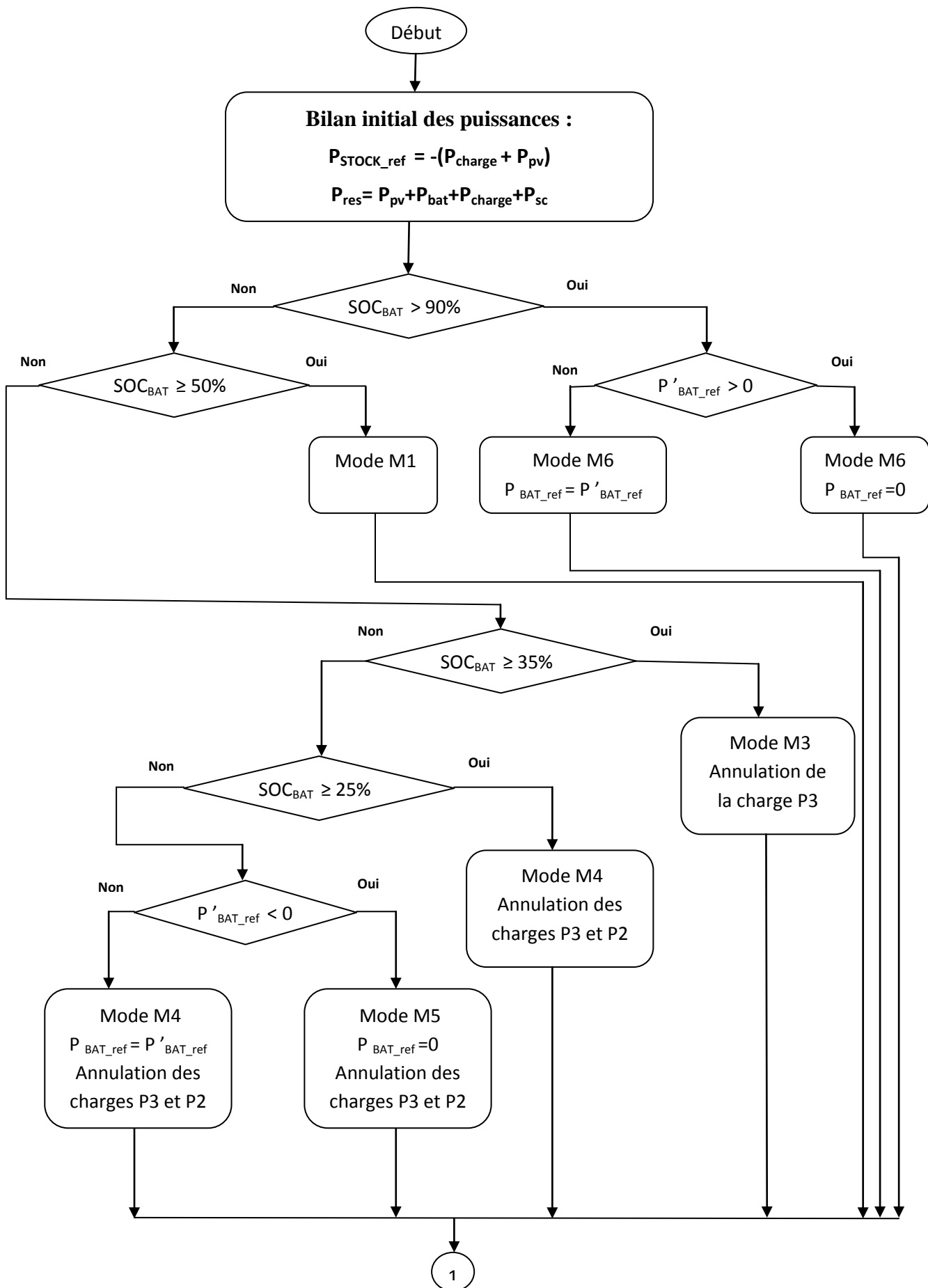


Figure I.6 : Système PV en mode connecté réseau [41]

Conformément à la convention de signe, les lois de la physique imposent l'équilibre des puissances à chaque instant tel que :

$$P_{res}(t) = P_{PV}(t) + P_{bat}(t) + P_{charges}(t) + P_{sc}(t) \tag{I.5}$$



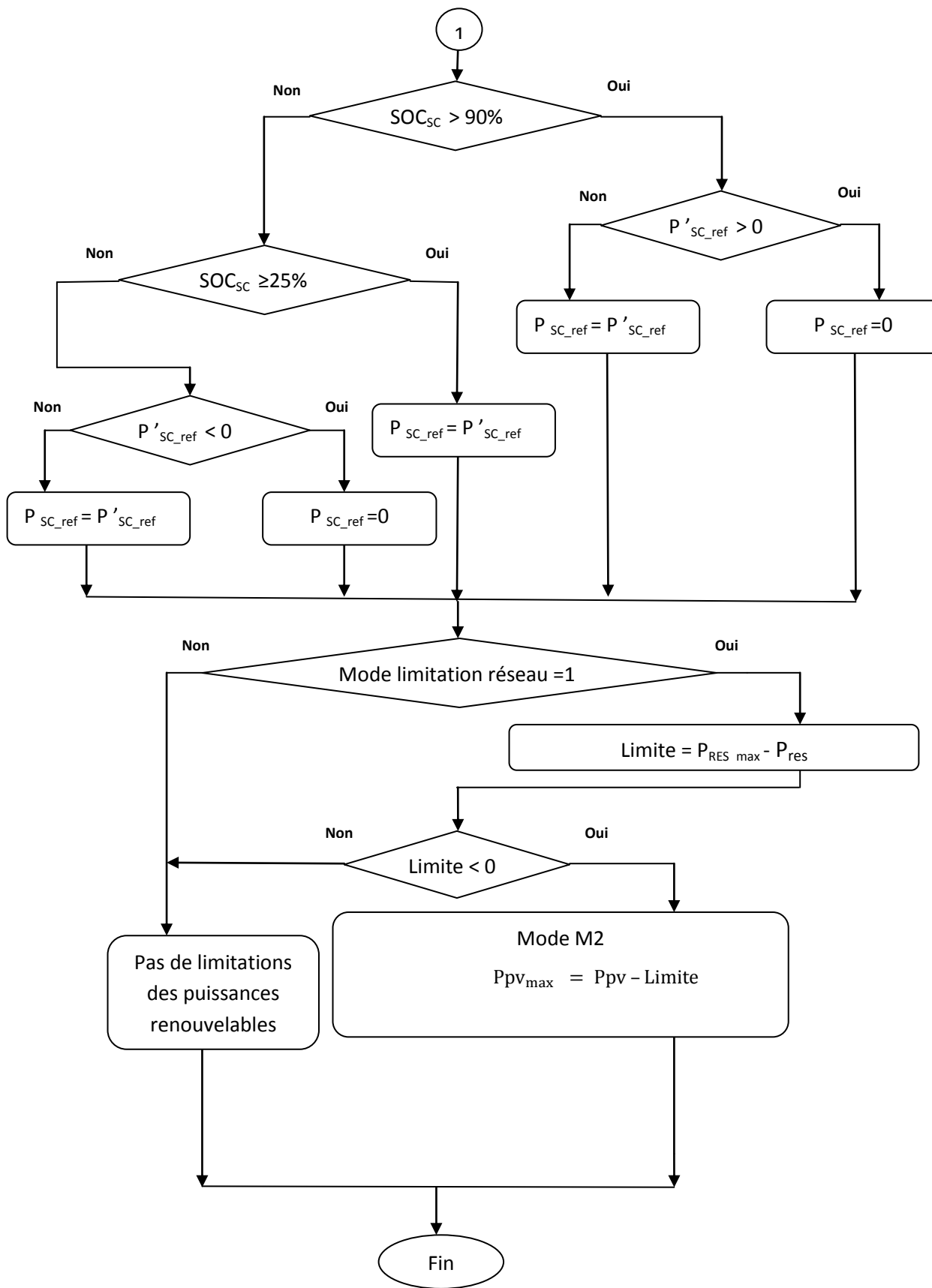


Figure I.7 : Algorithme de gestion des flux énergétiques du système photovoltaïque en mode connecté au réseau

I.4. Résultats de simulation et interprétations

Cette simulation réalisée sous l'environnement MATLAB permet de tester l'efficacité de l'algorithme de la gestion d'énergie à satisfaire la charge alternative qui comporte :

- Une charge d'habitation variable entre 500W et 3kW, (Première priorité P1).
- Un système de refroidissement de 500W, (Seconde priorité P2).
- Un système de pompage 100W, (Troisième priorité P3).

Les paramètres de la simulation du système sont présentés dans l'annexe.

L'irradiation solaire est générée de manière à avoir des variations rapides et autres lentes comme le montre la figure I.8.

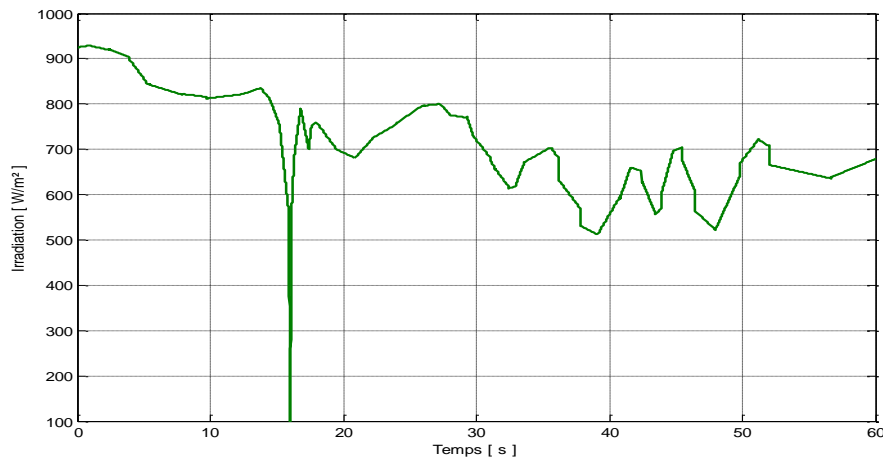


Figure I.8: L'irradiation solaire.

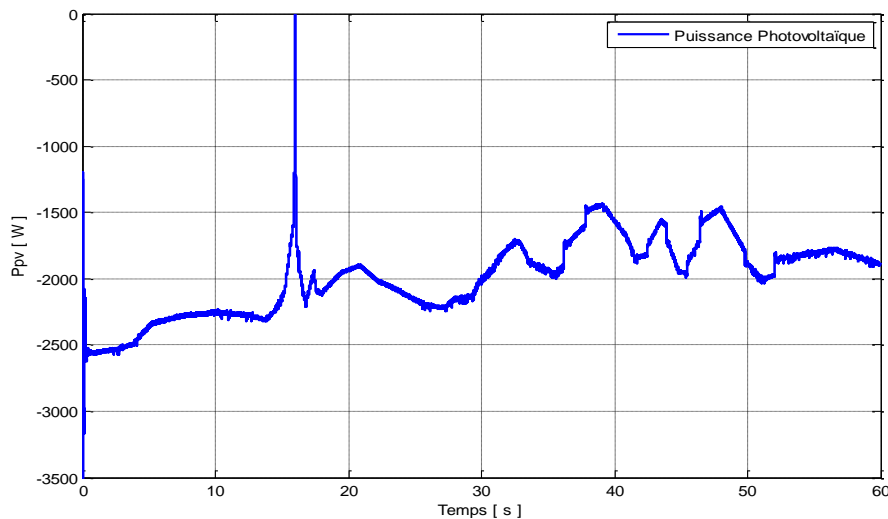


Figure I.9: Puissance PV

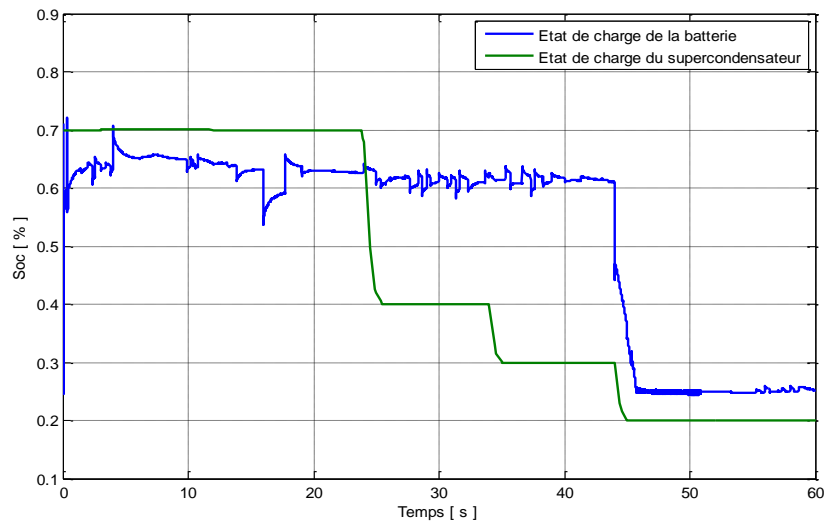


Figure I.10: Etat de charge de la batterie et du supercondensateur.

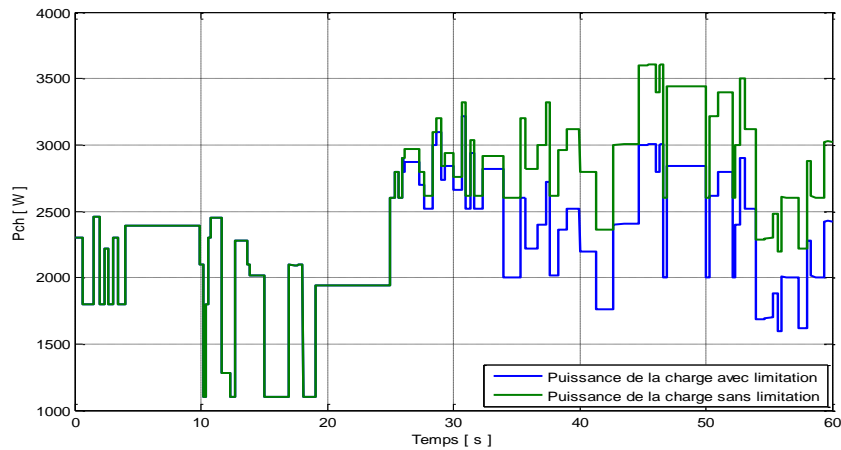


Figure I.11: Puissance de la charge.

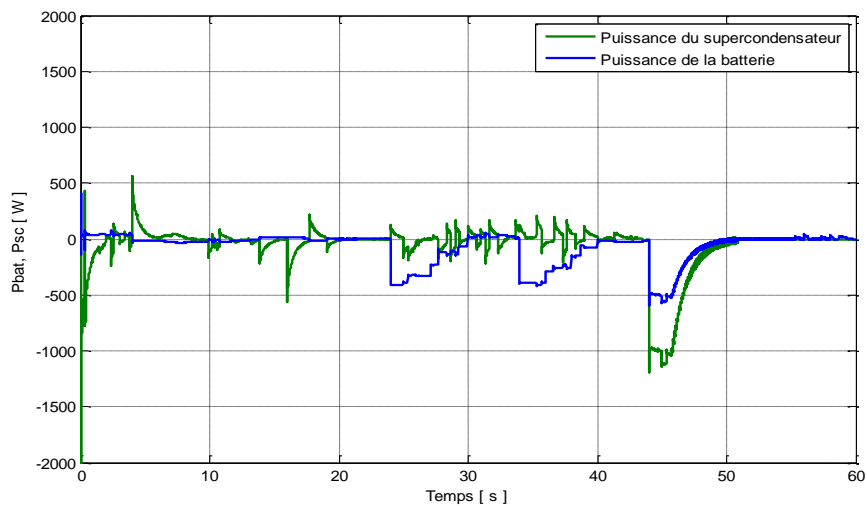


Figure I.12: Puissance de la batterie et du supercondensateur.

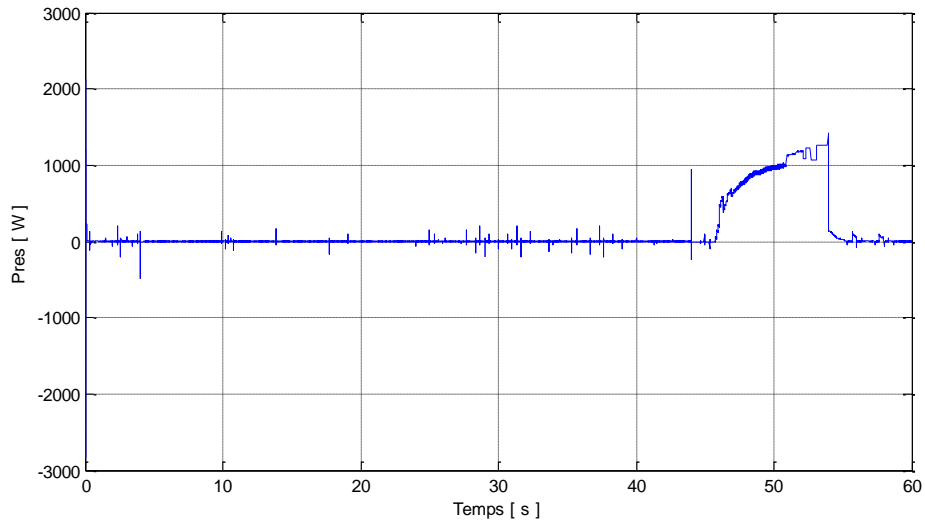


Figure I.13: Puissance du réseau.

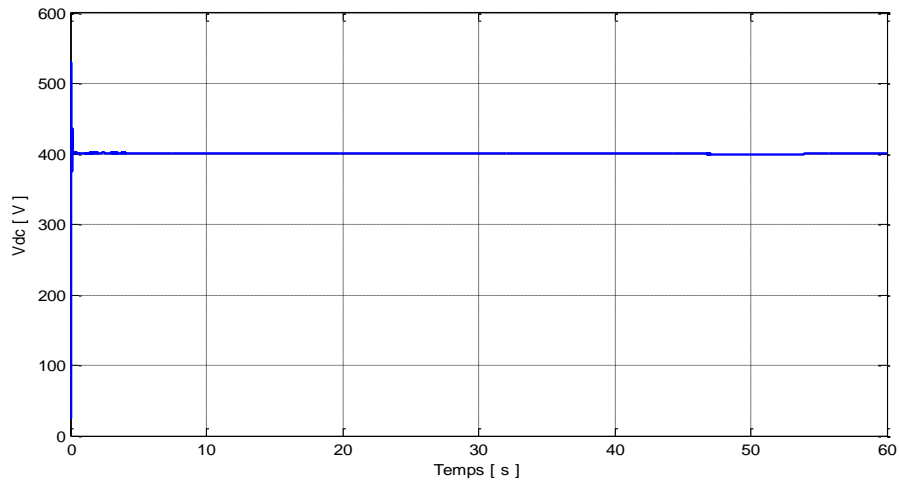


Figure I.14: Tension du bus continue.

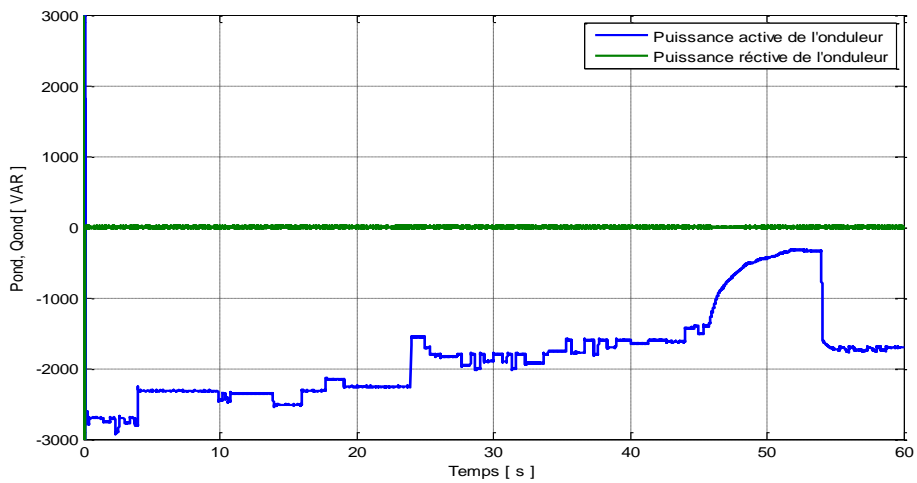


Figure I.15: Puissance active et réactive de l'onduleur.

La figure I.14 montre une tension du bus continu stabilisée à 400 V par la commande de l'onduleur. La puissance réactive de l'onduleur suit bien sa référence nulle comme l'illustre la figure I.15. Les supercondensateurs répondent bien aux variations transitoires de la charge, ce qui a permis d'avoir une bonne dynamique de fonctionnement du système de stockage (voir la figure I.12), et aussi une souplesse dans le passage entre les différents modes de fonctionnement.

Pour différents modes de fonctionnement et selon le SOC des batteries, l'algorithme de gestion réagit selon les objectifs de gestion prédéfinis. Nous pouvons distinguer les modes d'opérations suivants :

➤ Entre 0s et 16s

L'état de charge des batteries est de 70%. Par conséquent, le système est dans le mode de fonctionnement normale M1. Pendant ce mode, le générateur photovoltaïque produit de l'énergie selon l'irradiation solaire, comme le montre la figure I.8. En outre, toutes les charges sont connectées (voir figure I.11) et le système reste indépendant vis-à-vis du réseau électrique (voir figure I.13).

➤ Entre 16s et 24s

Il y a une diminution brusque de l'irradiation solaire, ce qui perturbe la puissance générée par le système photovoltaïque, donc pendant cette courte durée la charge n'est pas satisfaite, donc le supercondensateur entre en action comme le montre la figure I.10, juste le temps que l'irradiation augmente, après cela le système PV satisfait les charges, donc on est toujours dans le mode normale M1.

➤ Entre 24s et 34s

Le système fonctionne dans le mode faible état de charge M3, car l'état de charge des batteries est dans les 40% (voir figure I.10). Par conséquent, la charge avec la plus faible priorité P3 est commutée en fermeture comme le montre la figure I.11. Les batteries sont en phase de déchargement, et les supercondensateurs réagissent bien aux fluctuations de la charge (voir figure I.10).

➤ Entre 34s et 44s

Le SOC des batteries devient inférieur à 35%, cela veut dire que le système est dans le mode très faible état de charge M4. L'algorithme de gestion d'énergie commute en fermeture la charge avec la seconde priorité P2, en plus de P3 qui est déjà déconnectée, comme l'illustre la figure I.11. Dans ce mode, les batteries ne peuvent se charger (voir figure I.10), et nous constatons que le système photovoltaïque assure l'alimentation de la charge principale indépendamment du réseau électrique (voir figure I.10).

➤ Entre 44s et 54s

Le système est dans le mode sollicitation du réseau électrique M5. Car l'état de charge des batteries est de 20%, et l'énergie produite par le système photovoltaïque est inférieure à la demande de la charge principale P1. Le système fait recours au réseau électrique comme le montre la figure I.13.

➤ Entre 54s et 60s

Dans cette période l'état de charge des batteries est de 20%, cela signifie que le système est dans le mode très faible état de charge M4 comme le montre la figure I.10. Dans ce mode, les batteries ne peuvent se charger (voir figure I.10), et le système photovoltaïque assure l'alimentation de la charge principale indépendamment du réseau électrique (Figure I.13).

I.5. Conclusion

Afin de développer un algorithme de gestion d'énergie, une description détaillée a été donnée pour les objectifs de contrôle et la stratégie de supervision suivie. Finalement, la simulation numérique a permis de démontrer les performances de l'algorithme de gestion d'énergie proposé, dans plusieurs modes de fonctionnement du système photovoltaïque.

Conclusion générale et Perspectives

Le monde de l'énergie photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de l'industrie connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour cette source d'énergie. Une industrie majeure est en cours de constitution comme le montre l'analyse de la situation et des évolutions. De façon intéressante et exemplaire, les possibilités d'innovation sont très grandes, portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières et les technologies de convertisseurs existantes, et d'en consolider de nouvelles.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome puis connecté au réseau. On a donc, commencé par une présentation de l'état de l'art des multiples technologies associées aux constituants d'une chaîne photovoltaïque dans le but d'étudier le fonctionnement de ces systèmes.

Pour le faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des différents modèles des composants constituant le système. Les modélisations considérées ont été choisies de manière à régir le fonctionnement de chaque équipement, en optant pour des modèles à la fois simples et performants.

Dans le deuxième chapitre, nous avons développé un algorithme de supervision, qui a eu comme objectifs principaux de satisfaire la charge et de gérer les flux énergétiques entre les différents composants du système. En outre, la simulation du système photovoltaïque illustre l'efficacité de l'algorithme de gestion d'énergie proposé pour différentes contraintes du fonctionnement.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives que nous présentons ci-dessous :

- Le rendement maximal théorique des cellules de troisième génération obtenu en laboratoire tourne autour de 45%, ce qui fait rêver les industriels autant que les chercheurs. Les filières : multi-jonctions, organiques, et à concentration... représentent une importante piste à explorer afin de rentabiliser le photovoltaïque.
- Un travail approfondi pourra être consacré à l'étage de conversion entre les panneaux PV et le bus continu afin d'explorer de nouvelles structures de convertisseurs présentant des pertes moins importantes et donc des rendements plus élevés.
- Au niveau du stockage, la technologie lithium-ion est à l'heure actuelle prometteuse en raison d'une meilleure tenue en cyclage ainsi que de meilleurs rendements annoncés en charge comme en décharge. Cette piste est intéressante à explorer notamment, pour les systèmes autonomes.

Paramètres de l'Onduleur:

- *Capacité de bus DC : 30 mF*
- *Filtre RL de sortie : $R_f = 1 \Omega$; $L_f = 10 \text{ mH}$*

Paramètres du stockage par Batteries :

- *Nombre de cellule 2V en série ns : 12*5*
- *Taux de décharge D : $10^{-5} \text{ heure}^{-1}$*
- *Rendement charge / décharge : 0.8*
- *Capacité énergétique maximale : 13200 Wh*
- *Inductance hacheur Bidirectionnel : 1.1 mH*

Paramètres du stockage par Supercondensateurs :

- *Capacité de pack supercondensateurs $C_{sc} = 33 \text{ F}$*
- *Nombre de pack en série : 7*
- *Paramètre de modèle de pack supercondensateurs :*
 - *$R_0 = 0.0577 \Omega$; $C_0 = 7.8272 \text{ F}$; $K_v = 0.7302$; $R_2 = 868.8132 \Omega$; $C_2 = 0.2072$;*
 - *$EPR = 44 \Omega$; $V_{max} = 38 \text{ V}$;*
- *Inductance hacheur Bidirectionnel : 1 mH*

- [1] V. Quaschnig, "Understanding Renewable Energy Systems", Livre Edition Earthscan, Grande Bretagne, 2005.
- [2] www.bp.com/statisticalreview, Rapport technique British Petroleum, juin 2010.
- [3] B. Multon, " Production d'énergie électrique par sources renouvelables ", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 4 005.
- [4] T. Scimone, " Energy Storage in Electric Power Generation Plant from Renewable Sources ", Université Degli Studi di Catania, Italie, 2010.
- [5] S. Astie, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule ", Techniques de l'Ingénieur, D 3 936.
- [6] W. Omran, "Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems", Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [7] www.thewindpower.net
- [8] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne", Doctorat, université de Nantes, 2003.
- [9] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 3 960.
- [10] J. M. Noël, "Énergie éolienne pour la fourniture d'électricité", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique BE 8 585.
- [11] M. Amin, "Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converter", Doctorat, Université Internationale de Florida, 2012.
- [12] S. Elaimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [13] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, et M. L. Crow, "Energy Storage Systems for Advanced Power Application", Proceedings Of The IEEE, VOL. 89, NO. 12, December 2001.
- [14] J. De Dinechin , "Le stockage énergétique", Cours A5-2 Energies Renouvelables. ENSTA, 2007.
- [15] I. Vichiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelable dans un réseau autonome", Mémoire de Doctorat, Université du Havre, Décembre, 2005.
- [16] Stéphane PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [17] H. Fakham, D. Lu, et B. Francois, "Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load Following Applications", IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 58, NO. 1, January 2011.

Bibliographie

- [18] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Doctorat en Energétique, Université Technique de Sofia, 2011.
- [19] H. G. Arantazamendi, "Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée: application aux micro-réseaux", Doctorat, INP de Grenoble, 2006.
- [20] Salah Mohamed AIT-CHEIKH, « Étude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », doctorat d'état en Automatique, ENP, 2007.
- [21] L. Stoyanov, G. Notton et V. Lazarov, " Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1, 2007, PP.1-18.
- [22] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique". Doctorat, CNAM, Paris, 2008.
- [23] D. Lu, "Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain", Doctorat, ECL Lille, 2010.
- [24] J. Lachaize, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction", Doctorat automatique, INP de Toulouse , 2004.
- [25] L.Zarour, « Étude et réalisation d'une alimentation d'un centre de transmission à travers une source d'énergie photovoltaïque »,Projet de fin d'études, EMP, Juin 2004
- [26] G.Pinon, « Onduleurs », Cours de physique appliquée, Académie d'Aix-Marseille, 2008
- [27] A. Mahmoud, "Power conditioning unit for small scale hybrid pv-wind generation system", These de Doctorat, Universitie de DURHAM ,2010.
- [28] James P. Dunlop, P.E, « Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems», Florida Solar Energy Center &Sandia National Laboratories Photovoltaic Systems Applications Dept. Publication, Cocoa, January 1997.
- [29] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays», IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.24, NO. 5, Mai 2009

Bibliographie

- [30] Caisheng Wang et al « Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System», IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 23, NO. 3, September 2008.
- [31] Rémi SAISSET, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. », thèse de doctorat en sciences en Génie Électrique, Institut national polytechnique de TOULOUSE, 2004.
- [32] Yann PANKOW, « Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2004
- [33] Farid BOUCHAFAA, « Étude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC, Application à la conduite d'une MSAP», Thèse de Doctorat, ENP, 2006
- [34] B. Flèche, D. Delagues, « Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE », cours Electrotechnique, Juin 2007
- [35] A. Iqbal, et A. Lamine, "Matlab/simulink model of space vector pwm for three-phase voltage source inverter", UPEC, 2006.
- [36] G. Tsengenes, et G. Adamidis, "A multi-function grid connected PV system with three level NPC inverter and voltage oriented control", Elsevier Solar Energy, 2011.
- [37] G. A. Raducu, "Control of Grid Side Inverter in a B2B Configuration for WT Application", Master, Aalborg University, 2008.
- [38] P. Antoniewicz, "Predictive Control of Three Phase AC/DC Converters", Thèse de Master, Université de Warsaw, 2009.
- [39] M. Makhlof , F. Messai1, et H. Benalla, "Modeling and Simulation of Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Battery Distributed Generation System", Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering Vol. 3, No. 1, January 2012.
- [40] P. Damien, "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides", Thèse de Doctorat, Université de Belfort-Montbéliard, 2010.
- [41] Y. Riffonneau, "Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau", Doctorat, Université Joseph Fourier, 2009.

Bibliographie

- [42] L. Bertini, "Modeling and Optimization of a Fuel Cell Hybrid System", Thèse de Master, KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [43] R. Faranda, M. Gallina, et D.T. Son, "A new simplified model of Double-Layer Capacitors", IEEE, 2007.
- [44] W. Xiao, W. G. Dunford, et P. R. Palmer, "Regulation of Photovoltaic Voltage", IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 54, no. 3, juin 2007.
- [45] E. B. Muhando, T. Senjyu, et A. Uehara, "LQG Design for Megawatt-Class WECS With DFIG Based on Functional Models' Fidelity Prerequisite", IEEE Transaction On Energy Conversion, vol. 24, no. 4, pp. 893-904, Dec. 2009.
- [46] F. Valenciaga, et P. F. Puleston, "Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 20, NO. 2, June 2005.
- [47] C. Wang, et M. H. Nehrir, "Power Management of a Stand-Alone Wind / Photovoltaic/Fuel Cell Energy System", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 23, NO. 3, September 2008.
- [48] BISKER Asma, CHIRI Meriem "Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau", PFE, ENP, 2012.
- [49] A. BOUHARCHOUCHE "ETUDE ET COMMANDE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION HYBRIDE EOLIENPHOTOVOLTAÏQUE", Magistère, EMP, 2012.
- [50] Ludovic PROTIN, Stéphan ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, 2012.