

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Electrique
Laboratoire de Commande des Processus



Mémoire de Magister

Spécialité : Automatique
Option : Automatique des Systèmes Industriels

Présenté par :

Zakaria ZIADI

Ingénieur d'Etat en Automatique, de l'ENP

Intitulé :

Commande Hybride d'une Maison à Energie Positive

Soutenue publiquement le 17/10/2010 à l'amphi C1 à 11h devant le jury composé de :

M. TADJINE	Professeur à l'ENP	Président
F. BOUDJEMA	Professeur à l'ENP	Rapporteur
M. MAHMOUDI	Professeur à l'ENP	Examineur
M. HADDADI	Professeur à l'ENP	Examineur
C. LARBES	Professeur à l'ENP	Examineur

Année universitaire : 2009/2010

Mémoire préparé au sein du Laboratoire de Commande des Processus de l'ENP
10, Avenue Hassen Badi, BP 182, 16200 El-Harrach, Alger

Dédicaces

Je dédie ce travail surtout à mes parents (ma chère mère et mon cher père) grâce à eux que j'ai trouvé le chemin de la réussite et que j'ai pu suivre convenablement de longues études. Ainsi de m'avoir supporté, dans les deux sens du terme. Sans leur travail et leur courage, rien n'aurait été possible. Je ne leur serai jamais trop reconnaissant, ainsi qu'à tous les membres de ma famille (frères et soeurs), à mes amis et tous mes proches.

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu pour m'avoir donné la force morale et physique pour accomplir ce modeste travail.

Je tiens d'abord à remercier Monsieur le Professeur **Farès BOUDJEMA** pour avoir accepté mon encadrement, pour m'avoir proposé ce thème et pour m'avoir dirigé durant ce travail de recherche jusqu'à l'aboutissement de ce projet. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance à l'égard de tous les efforts qu'il a fournis, de la patience qu'il m'a montrée tout au long de cette année. Ses conseils et ses commentaires durant la phase de rédaction, ont été pour moi d'un grand secours et m'ont permis de le présenter sous cette forme finale.

Je remercie Monsieur **Mohammed TADJINE** Professeur à l'ENP, de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Que Messieurs les Professeurs **Mohand Oulhadj MAHMOUDI**, **Mourad HADDAI** et **Chérif LARBES** trouvent ici l'expression de mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur d'accepter l'examen de ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble des enseignants du Département d'Automatique spécialement à Monsieur le Professeur **Djamel BOUKHETALA**.

الملخص

اهتمنا في هذا العمل بالتحكم الهجين و زيادة مردود منزل ذو طاقة إيجابية ; منزل ينتج طاقة أكثر مما يستهلك. نظام إنتاج الطاقة في هذا المنزل المقترح يتكون من سلسلة تحويل كهروضوئية و رياحية مرتبطة فيما بينها بالمحول المستمر المتناوب ذو المصفي و بطاريات التخزين عن طريق موصل التوتر المستمر. زود المنزل بنظام حراري لسد احتياجاته من الماء الساخن و للمساعدة في التدفئة. بعد وصف حالة هذا النوع من المنازل, إقْتُرِحَتْ نماذج لمختلف مكونات النظام, التحكم الهجين مزج بين نوعين من التحكم, التحكم بالمنطق الضبابي والتحكم الإنزلاقي, وذلك لضمان : زيادة مردود الطاقات الكهروضوئية و الرياحية بتتبع نقاط استطاعتهم القصوى , جودة الطاقة الكهربائية بالتحكم بتوتر الموصل المستمر وتوتر المحول المستمر المتناوب , وللتحكم في درجة حرارة الماء الساخن المنزلي المنتج, بالإضافة إلى درجة حرارة جو المنزل.

الكلمات المفتاحية : التحكم الهجين, زيادة المردود, منزل ذو طاقة إيجابية, الطاقة الكهروضوئية, الطاقة الرياحية, موصل التوتر المستمر, بطاريات التخزين, المحول المستمر المتناوب, المحول المستمر المستمر, الماء الساخن المنزلي, المنطق الضبابي, التحكم الإنزلاقي.

Résumé

Dans ce travail, notre intérêt s'est porté sur la commande hybride et l'optimisation d'une maison à énergie positive ; une maison qu'elle produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Le système de production d'énergie de la maison proposée se comporte d'une chaîne de production photovoltaïque et éolienne, interconnectées par un bus continu à des batteries de stockage et un onduleur muni d'un filtre LC. Un système thermique est installé dans la maison pour satisfaire ses besoins en eau chaude sanitaire et pour aider au chauffage.

Après un état de l'art sur ce type des maisons, des modèles de différents composants du système sont proposés. La commande hybride a combiné deux types de commande, flou et par mode de glissement, pour assurer : L'optimisation des énergies photovoltaïque et éolienne, en poursuivant leurs points de puissance maximale ; La qualité de l'énergie électrique en commandant la tension de bus continu et la tension de sortie de l'onduleur ; et le contrôle de température de l'eau chaude produite, ainsi que celle de l'atmosphère de la maison.

Mot clés : commande hybride, optimisation, maison à énergie positive, photovoltaïque, éolien, bus continu, batteries de stockage, onduleur, hacheur, eau chaude sanitaire, logique flou, mode de glissement.

Abstract

In this work, our goal concerns the hybrid control and the optimization of a plus-energy-house; a house which it produces more energy than it consume. The power system of the proposed house is composed of a photovoltaic and wind energy conversion systems, inter-connected by a DC-bus to storage batteries and an inverter with filter. A thermal system is settled in the house to satisfy its requirements of domestic hot water and to help in heating.

After a survey on this type of the houses, the models of various components of the system are proposed. The hybrid control combined two types of control, Fuzzy and sliding mode controllers, to ensure: The optimization of photovoltaic and wind energies, by tracking their maximum power points; the quality of electrical energy by controlling the DC-bus voltage and the inverter output voltage; and to control the domestic hot water temperature, as the ambient temperature of the house.

Keywords: hybrid control, optimization, plus-energy-house, photovoltaic, wind energy, DC-bus, storage batteries, inverter, chopper, domestic hot water, fuzzy logic, sliding mode.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

Chapitre I: Etat de l'Art sur les Maisons à Energie Positive.

I.1. Introduction	4
I.2. Maison à Energie Positive (MEP)	4
I.2.1. Les concepts de maisons performantes	4
I.2.2. Définition d'une Maison à Energie Positive	5
I.3. Techniques utilisées dans une maison à énergie positive	6
I.4. Conception de la maison à énergie positive proposée	7
I.4.1. Sources d'énergie renouvelable	7
I.4.1.1. Energie solaire photovoltaïque	7
I.4.1.2 Energie éolienne.....	11
I.4.1.2. Energie solaire thermique	16
I.4.2. Convertisseurs électriques (éléments de gestion)	18
I.4.2.1. Les hacheurs (convertisseur DC/DC)	18
I.4.2.2. Les onduleurs (convertisseur DC/AC).....	19
I.4.2.3. Les redresseurs (convertisseur AC/DC).....	20
I.4.3. Système de stockage	22
I.4.4. Le système de commande et de supervision	22
I.4.5. Charges	23
I.5. Maison à énergie positive et l'être humain	24
I.6. Conclusion	24

Chapitre II: Modélisation des Composants de la Maison à Energie Positive.

II.1. Introduction	25
II.2. Modélisation de la chaine photovoltaïque.....	25
II.2.1. Générateur photovoltaïque	26
II.2.2. Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost »	28
II.3. Modélisation de la chaine éolienne	31
II.3.1. Topologies des chaines éoliennes basées sur les MSAPs.....	31
II.3.2. Turbine éolienne	33
II.3.3. Machine Synchrone à Aimant Permanent	34
II.3.4. Redresseur Triphasé à diodes	37
II.4. Système de stockage électrique.....	38

II.4.1. Batterie.....	38
II.4.2. Hacheur réversible en courant	39
II.5. Bus continu.....	40
II.6. Onduleur et filtre de sortie	41
II.7. Système de production d'eau chaude sanitaire	43
II.7.1. Collecteur plat.....	44
II.7.2. Réservoir de stockage avec échangeur de chaleur.....	45
II.8. Modélisation thermique d'une chambre de la maison	46
II.8.1. La chambre de la maison	46
II.8.1. Le chauffage auxiliaire	49
II.9. Conclusion.....	50

Chapitre III: Commande Hybride et Optimisation de la Maison à Energie Positive.

III.1. Introduction.....	51
III.2. Commande hybride	51
III.3. Commande et optimisation à base de logique floue	52
III.3.1. La logique floue	52
III.3.1.1. Terminologie de la logique floue	52
III.3.1.2. Structure de base d'un contrôleur flou	53
III.3.2. Le contrôleur flou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale.....	56
III.3.2.1. Poursuite du point de puissance maximale	56
III.3.2.2. MPPT appliqué sur les systèmes photovoltaïques	56
III.3.2.3. MPPT appliqué sur les systèmes éoliens	58
III.3.2.4. Principe de poursuite du point de puissance maximale par un contrôleur flou	60
III.3.3. Le contrôleur flou appliqué à la stabilisation du bus continu	65
III.3.4. Le contrôleur flou appliqué au système de production d'eau chaude	67
III.3.4.1. Control de la température d'eau chaude sanitaire	67
III.3.4.2. Control de la température d'une chambre de la maison.....	68
III.3.5. Gestion des Commutation	68
III.4. Commande de l'onduleur par les modes glissants	70
III.4.1. Conception de la commande par mode de glissement	70
III.4.1.1. choix de la surface de glissement.....	71
III.4.1.2. Condition d'existence et de convergence.....	71
III.4.1.3. Calcul de la commande	72
III.4.2. Application de la commande par mode de glissement à l'onduleur triphasé	73

III.4.2.1. Mode de glissement avec surface de Slotine.....	74
III.4.2.2. Mode de glissement avec surface non linéaire.....	75
III.4.2.3. Surface de glissement synthétisée par Backstepping	77
III.5. Conclusion	78

Chapitre IV: Simulations et Résultats.

IV.1. Introduction.....	79
IV.2. Simulation de la chaine de production photovoltaïque.....	79
IV.2.1. Comportement du système photovoltaïque sans contrôleur MPPT	79
IV.2.2. Fonctionnement du système photovoltaïque sous des conditions constantes	80
IV.2.3. Fonctionnement sous des conditions météorologiques variables	80
IV.2.4. Fonctionnement sous des variations de la tension de bus continu.....	82
IV.2.5. Exemple de la production photovoltaïque sur une journée.....	83
IV.3. Simulation de la chaine de production éolienne	83
IV.3.1. Comportement du système éolien sans contrôleur MPPT	83
IV.3.2. Fonctionnement du système éolien sous des conditions constantes	84
IV.3.3. Fonctionnement sous des variations de la vitesse du vent.....	84
IV.3.4. Fonctionnement sous des variations de la tension de bus continu.....	86
En changeant la tension de bus continu, le point de fonctionnement	86
IV.4. Simulation de bus continu	87
IV.5. Simulation du système thermique.....	88
IV.5.1. Système de production d'eau chaude sanitaire	88
IV.5.1.1. système en boucle ouverte	88
IV.5.1.2. Système en boucle fermée.....	90
IV.5.2. Simulation du chauffage de la chambre.....	90
IV.6. Simulation de la tension de sortie de l'onduleur	92
IV.6. 1. Mode de glissement avec surface de Stoline	92
IV.6. 2. Mode de glissement avec surface non linéaire.....	94
IV.6. 3. Mode de glissement avec surface synthétisé par mode de glissement.....	97
IV.7. Conclusion	99
Conclusion Générale.....	100
Bibliographie	103

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le réchauffement climatique de la terre, engagé depuis quelques années, a occasionné une action à l'échelle mondiale pour en atténuer les conséquences voire inverser la tendance. A cet effet, le réchauffement climatique fait périodiquement l'objet de réunions internationales : Rio de Janeiro (1992), Berlin (1995), Genève (1996), Kyoto (1997), Buenos Aires (1998), La Haye (2000), Montréal (suivi du protocole de Kyoto 2005) et Copenhague (2009). Ces réunions ont pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

L'urbanisation rapide représente un des facteurs aggravants de ce dérèglement climatique. Jusqu'à 80 % de l'énergie mondiale est consommée dans les villes et a pour conséquence des quantités importantes d'émissions de gaz à effet de serre [Naz_08]. Le secteur du bâtiment consomme aujourd'hui 47% de l'énergie produite et est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre [Jos_06]. La production de dioxyde de carbone (CO₂) due à l'utilisation des carburants fossiles pour cet effet est maintenant reconnue comme cause majeure au réchauffement de l'atmosphère.

Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, le recours à des solutions limitant la consommation énergétique des maisons, aux énergies renouvelables et à une meilleure utilisation des combustibles fossiles devient impératif.

Ces solutions, appliquées aux maisons, amènent à travailler simultanément sur la consommation des maisons, sa structure et ses divers équipements, dès la phase de conception. La *maison à énergie positive* associe une grande partie de ces solutions. Ces maisons, combinant faibles besoins énergétiques et production énergétique décentralisée, sont encore peu répandues, notamment en raison des contraintes économiques et d'un faible retour d'expérience. Leur conception requiert la maîtrise du comportement du bâtiment et de ses composants en toute saison.

Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'énergie électrique et thermique proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre de l'atmosphère lors de leur exploitation. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement et l'intégration des énergies renouvelables dans le secteur d'habitats.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie dans une maison doit avoir une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de coût et de disponibilité, étant entendu que le bilan « écologique » est supposé a priori favorable. Les moyens de production tels que l'éolien, le photovoltaïque, le solaire thermique etc. présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le but premier d'une maison à énergie positive est d'assurer l'énergie demandée par le consommateur, de rendre maximale la puissance provenant des sources d'énergie renouvelable et, si possible, rendre le bilan d'énergie positif et d'injecter le surplus d'énergie dans le réseau.

Pour la configuration de la maison à énergie positive, étudiée dans ce travail, nous avons retenu le système photovoltaïque et le système éolien comme source renouvelable d'énergie électrique. Le stockage d'énergie est facteur clef dans un système d'énergie hybride ; dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont reliées aux systèmes de production d'énergie, photovoltaïque et éolienne, à travers un bus continu et des convertisseurs de puissance. Un onduleur triphasé muni d'un filtre de sortie joue le rôle d'une interface entre le bus continu et la charge et/ou le réseau, afin de les alimenter par une tension sinusoïdale à amplitude et fréquence constantes. On a aussi bénéficié de l'énergie solaire par une installation thermique pour produire l'eau chaude sanitaire, cette dernière est exploitée pour aider à chauffer l'atmosphère de la maison.

Dans ce contexte, le travail présenté ici se focalise sur la commande et l'optimisation des systèmes de production d'énergie renouvelable dans les maisons à énergie positive. La commande hybride convient beaucoup à un tel système, elle combine plusieurs commandes afin de satisfaire l'utilisateur à travers :

- l'optimisation des énergies renouvelables, photovoltaïque et éolienne, à travers des commandes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).
- La qualité de l'électricité produite, en commandant l'onduleur par une commande robuste, et la stabilisation de la tension de bus continu.
- La gestion du transfert de la chaleur produite par les capteurs solaires thermiques, fournie aux systèmes de chauffage d'eau et d'atmosphère.

Le travail présenté ici est organisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différents concepts des maisons performantes et la définition de la maison à énergie positive, un état de l'art de ce dernier système est donné. Notre travail portant sur un système d'énergie hybride photovoltaïque/éolienne/thermique et batteries de stockage, une attention particulière a été consacrée à ces types de source et de stockage.

Le deuxième chapitre présente la configuration de la maison à énergie positive proposée ainsi que la modélisation de ces différents composants. Ces derniers sont modélisés dans le but d'analyser le comportement dynamique du système complet face aux variations climatiques et de charge. Le système, tel qu'il est modélisé, permet une analyse dynamique en régime de charge équilibré.

Dans le troisième chapitre, les différents concepts de la commande hybride sont présentés, puis des notions théoriques des commandes constituant notre commande hybride sont abordées. Nous avons commencé par la commande par logique floue et ses applications dans : l'optimisation de l'énergie photovoltaïque et éolienne, la stabilisation de la tension du bus continu, et la gestion de l'énergie thermique. En vue de l'optimisation, un seul régulateur flou a été utilisée pour toutes ces applications. La commande par mode glissant a été utilisé pour la commande de l'onduleur afin d'obtenir une tension sinusoïdale à amplitude et fréquence constante, quelque soit les perturbations.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats de simulation. Ce chapitre présente l'analyse du comportement des différents sous-systèmes, modélisé dans le chapitre deux, et simulés face aux variations climatiques et de charges. Une simulation du système complet a été faite pour voir l'efficacité de notre commande hybride.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale synthétisant les conclusions de tous les chapitres, et par des perspectives de ce mémoire.

Chapitre I :

Etat de l'Art sur les Maisons à Energie Positive

I.1. Introduction

Le réchauffement climatique et les risques de pénurie d'énergies fossiles sont deux enjeux majeurs auquel nous devons faire face au cours du XXIème siècle. Un secteur présente des marges d'amélioration de ses performances énergétiques : celui de l'habitat. L'idée-force de la mutation est de faire de maison un lieu de production d'énergie décentralisée utilisant les énergies renouvelables : vent, soleil, géothermie superficielle, biomasse ... La maison assure ses propres besoins, et l'énergie non consommée est restituée sur le réseau qui devient une immense coopérative de production. C'est le concept de maison à énergie positive.

Ce premier chapitre vise à poser le cadre précis de notre sujet. Pour cela, notre but est de définir le concept de la maison à énergie positive et le situer par rapport aux différents concepts de maisons performantes existantes. Aussi, de décrire la maison proposée à étudier dans ce travail.



Figure I.1. Exemples de bâtiments à énergie positive à Freiburg en Allemagne

I.2. Maison à Energie Positive (MEP)

Parmi les nombreux concepts de maisons performantes, la maison à énergie positive est parmi les plus récents [Fra_08]. En raison de son haut niveau d'exigence, aucune réglementation et aucun standard ne l'ont encore intégré et sa définition n'est donc pas encore clairement établie. Identifier les spécificités de ce concept, et en proposer une définition est nécessaire. Il passe notamment par l'analyse des principaux concepts des maisons performantes existantes [Ste_08].

I.2.1. Les concepts de maisons performantes

Les maisons dites « performantes » sont associées, contrairement aux maisons plus ordinaires, à des préoccupations environnementales, en particulier vis-à-vis de leurs besoins énergétiques. Ces différents concepts se différencient par leurs performances énergétiques de plus ou moins haut niveau [Yas_09].

- **La maison à basse consommation « Low Energy House »:** Les consommations en énergie de ce type de maison sont plus faibles que les maisons ordinaires, sans toutefois inclure de moyen de production d'énergie.

- **La maison passive « Passive House »:** Cette maison présente des consommations en énergie très faibles. Les apports d'énergie dits « passifs » comme l'énergie solaire ou l'énergie dégagée par les appareils internes à l'habitat suffisent, combinés à des systèmes de ventilation, à assurer une température suffisante dans l'édifice. Ce concept associe également à ces économies d'énergies, une réduction de la consommation électrique.

- **La maison zéro énergie « Zero Energy House »:** Ce type de maison utilise des moyens de productions d'énergie locaux, qui suffisent à fournir la quantité d'énergie nécessaire. La maison étant à très faible consommation, le bilan énergétique annuel est donc nul.

- **Le bâtiment autonome « Stand Alone House »:** Son apport d'énergie ne dépend d'aucune source extérieure, car toute l'énergie nécessaire est produite sur place. Le principe est similaire à la maison « zéro énergie », à la différence près que le bilan énergétique d'un bâtiment autonome est nul à tout instant, et non pas de façon globale sur une année.

Reste le concept du bâtiment à énergie positive, détaillé ci-après.

I.2.2. Définition d'une Maison à Energie Positive

Il n'a pas été possible de tirer de la littérature une définition claire, rigoureuse et unique de ce concept. La plus part des définitions rencontrées se rapportent aux maisons zéro énergie et demeurent très variées et assez peu précises [Vos_07]. La définition présentée ici a été proposée par [Ste_08] :

« Sur une année donnée de sa phase d'exploitation, un bâtiment assurant un usage résidentiel ou tertiaire pour lequel il est conçu est à « énergie positive » si et seulement si l'énergie totale exportée est supérieure à l'énergie totale importée par le bâtiment. Le bilan intègre aussi les parties annexes du bâtiment lorsqu'elles participent aux fonctions pour lesquelles il est conçu (local technique, cave, garage, etc.) »

On peut aussi définir les maisons à énergie positive, tous simplement et comme leurs nom l'indique, des maisons qui produisent plus d'énergie qu'elles n'en consomment.

I.3. Techniques utilisées dans une maison à énergie positive

Dans l'ensemble des maisons performantes, les habitats à énergie positive sont bien sûr ceux qui exigent le plus haut niveau de performances. Il existe néanmoins un certain nombre de solutions techniques éprouvées, et qui pourront constituer une maison à énergie positive. Ceux-ci reprennent donc les principes des maisons passives, mais sont complétés par éléments de production d'énergie [Yas_09].

Isolation thermique : Une isolation thermique haute performance est essentielle dans un bâtiment à énergie positive. Celle-ci présente plusieurs avantages, le plus évident, est de conserver la chaleur en hiver et l'air frais en été au sein de l'habitat, en économisant l'énergie nécessaire au chauffage ou au rafraîchissement des pièces.

L'étanchéité à l'air : Pour un bâtiment à énergie positive, une excellente herméticité à l'air est nécessaire, car une faille perturberait toute l'efficacité de l'isolation et de la ventilation des locaux.

La ventilation contrôlée : Le renouvellement de l'air, indispensable au bien-être et au confort dans une habitation, présente de nombreux avantages (hygiène, humidité, confort).

L'énergie solaire passive : L'énergie solaire, captée par les parties vitrées, est une énergie extérieure indispensable au fonctionnement des habitations à énergie positive. Les surfaces vitrées dépendent donc de l'orientation du bâtiment : 40% à 60% de surface vitrée sur la façade Sud, 10% à 15 % sur la façade Nord, et moins de 20% sur les façades Est et Ouest.

Construction compacte : La compacité peut jouer un rôle important dans le gain d'énergie de chauffage : la compacité d'un bâtiment est le rapport entre surface thermo-conductrice et volume à chauffer.

Limitation des consommations d'énergie des appareils ménagers : De nombreuses économies d'énergies peuvent être faites dans le choix d'appareils électroménagers adéquats. Parmi les plus énergivores, on trouvera les lave-vaisselles et lave-linges, fours ou réfrigérateurs.

Moyens de production d'énergie : Pour une maison à énergie positive, la consommation globale d'énergie doit être plus faible que l'énergie qu'elle produit. Il est donc nécessaire d'associer aux techniques de réduction de consommation d'énergie, des moyens de production d'électricité et de chaleur, ainsi que des infrastructures adaptées pour stocker et transporter ces énergies. Ce type de maison pourra donc accueillir :

- Des modules solaires photovoltaïques installés sur le toit ou sur les façades fortement exposées au soleil, qui permettent de produire de l'électricité.
- Des capteurs solaires thermiques qui transmettent l'énergie solaire reçue à un fluide caloporteur, pour produire de la chaleur.

- Des aérogénérateurs comme les technologies micro-éoliennes pour produire de l'électricité.
- Utilisation de l'énergie géothermique pour récupérer de la chaleur, en utilisant souvent l'eau comme véhicule thermique.
- Utilisation de la biomasse (chaudière à cogénération biomasse fonctionnant à partir de bois ou d'huile par exemple) pour produire de l'électricité et de la chaleur.

I.4. Conception de la maison à énergie positive proposée

Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les panneaux solaires thermiques sont souvent utilisés dans les maisons à énergie positive. Les convertisseurs, les charges et une forme de gestion de l'énergie font également partie du système. Des systèmes de stockage électriques ou thermiques sont habituellement utilisés pour conserver les différents types d'énergie produite. Une description des composants habituels des systèmes de production d'énergie dans les maisons à énergie positive est donnée ci-après.

I.4.1. Sources d'énergie renouvelable

I.4.1.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelables la plus importante [Li-S_08] ; c'est le produit de la conversion directe du rayonnement solaire à travers les cellules photovoltaïques [Ach_99], c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque, qui fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité [Roy_98][His_08], ce phénomène dépend du matériel de semi-conducteur et de la longueur d'onde de la lumière incidente [Mar_09].

Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, considéré comme une énorme réserve d'énergie renouvelable largement distribuée [Wan_08], les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire d'électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une tension électrique apparaît dans les deux cotés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule [Roy_98].

a) Cellule photovoltaïque et ses caractéristiques

Appelée aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base de tout système photovoltaïque. Elle peut former en se groupant, des modules

photovoltaïques ou encore plus, des panneaux photovoltaïques, c'est ce qu'on appelle des générateurs photovoltaïques [Mar_09].

Le circuit équivalent idéal d'une photopile se compose d'une source de courant parallèlement à une diode. Les bornes de la sortie du circuit sont reliées à la charge [Deb_09].

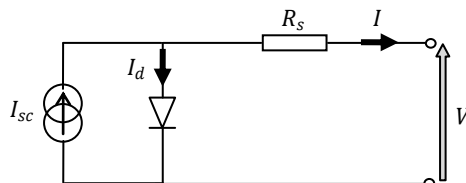


Figure I.2. Circuit électrique représentant une cellule photovoltaïque élémentaire.

Le courant de la cellule photovoltaïque I_{PV} en fonction de la tension V_{PV} est décrit par l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q V_{PV}}{KT}} - 1 \right) \quad (I.1)$$

avec :

I_{ph} est le photo-courant (A), I_0 est le courant de saturation inverse (A), q est la charge élémentaire constante de l'électron (égale à $1,602 \cdot 10^{-19} C$), K est la constante de Boltzman ($1,380 \cdot 10^{-23} J/K$), et T est la température de la jonction (K).

La caractéristique courant-tension ainsi que la caractéristique puissance-tension de la cellule sont illustrées dans la figure (I.3) et figure (I.4) respectivement.

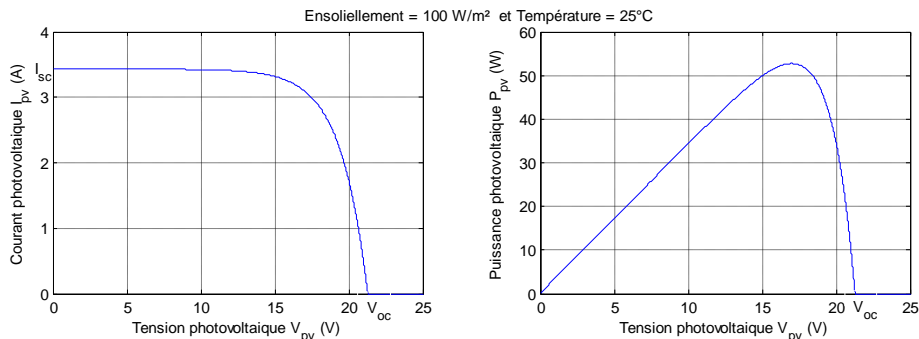


Figure I.3. Caractéristiques courant-tension (à gauche) et puissance-tension (à droite) d'une photopile.

Le courant produit par la photopile I_{PV} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire. Ce qui augmente la tension et la puissance de sortie de la photopile par la suite. Inversement à l'influence de l'éclairement sur les cellules photovoltaïques, l'effet de la température est inversement proportionnel à la tension et à la puissance [Roy_98][Ric_97].

La tension et la puissance du générateur photovoltaïque dépendent aussi de la manière d'association de ces cellules. S'ils sont groupés en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Par contre, si on veut

augmenter le courant à une tension donnée, qui doit être identique pour tous les éléments, l'association doit être en parallèle [Ric_97].

b) Types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques peuvent être classifiés comme suit : Autonome, Hybride, ou Connecté au réseau.

- Des systèmes autonomes de photovoltaïque sont utilisés dans les sites isolés qui n'ont pas accès au réseau électrique. C'est la solution économique la plus requise pour assurer l'électricité [Ras_01] [Lib_07].

- L'énergie photovoltaïque peut être ajoutée à d'autres sources d'énergies comme l'éolienne, le diesel et les groupes électrogènes de combustible fossile pour fournir la puissance 24 heures économiquement et efficacement [Ras_01]. L'intégration de ces sources d'énergie forme un système énergétique hybride, qui est une excellente option pour la production d'énergie [Deb_09]. La figure (I.4.b) montre un schéma d'un système hybride diesel de photovoltaïque.

- Dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, des panneaux solaires photovoltaïques sont reliés à un réseau par des convertisseurs électriques. Ces systèmes peuvent être petits, tels que les systèmes résidentiels de dessus de toit ou des grands systèmes connectés au réseau, cas d'une centrale électrique photovoltaïque [Ras_01]. Pendant que le coût des systèmes photovoltaïques continue à diminuer, les systèmes connectés aux réseaux deviennent plus économique [Rog_05].

Approximativement, 110 MW de systèmes reliés à une grille ont été installés au Japon, 75 MW ont été installés en Allemagne, et 15 MW ont été installés aux Etats-Unis en l'année 2001 [Ant_03].

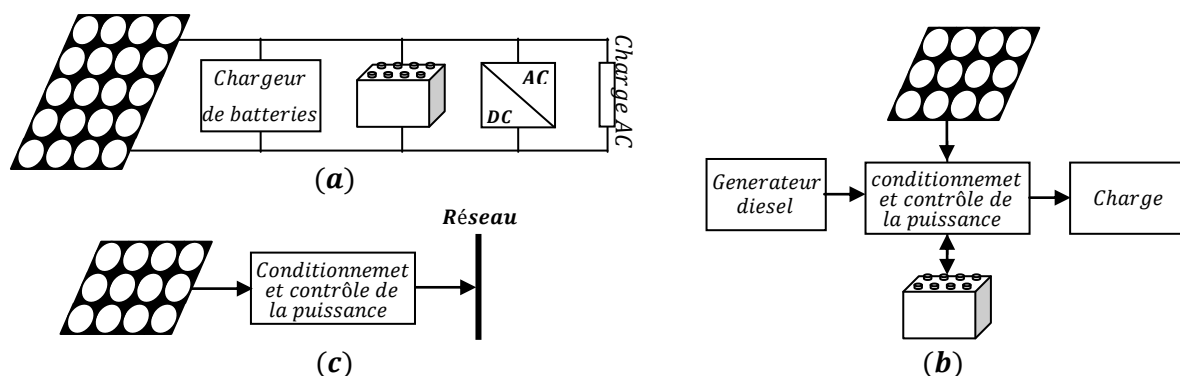


Figure I.4. Types des systèmes photovoltaïque : (a) autonome, (b) hybride (PV-diesel), (c) connecté au réseau

c) Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse, elle est connue par ses multiples avantages en tant qu'énergie inoffensive, la plus convenable pour les sites isolés, la durée de vie des générateurs photovoltaïques qui peut dépasser 30 ans et ainsi que d'autres avantages qui vont être cités par la suite. Malheureusement, les systèmes photovoltaïques présentent quelques inconvénients qui sont dues principalement à leur efficacité et leur coût élevé, Même si le prix est diminué considérablement ces dernières années et qu'il diminue toujours, un système PV demeure encore très coûteux.

Le problème d'efficacité peut être traité en optimisant l'énergie produite par le générateur PV en poursuivant son point de puissance maximale avec des techniques et commandes connues sous le nom de MPPT. Sans oublier aussi le problème d'ombrage partiel des cellules solaires traité dans plusieurs travaux [Zha_09] [Kaz_09].

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • La source d'énergie est vaste et essentiellement infini (renouvelable). • Aucune émission, aucune combustion ou carburant radioactif, ne contribue au changement climatique ou à la pollution global, c'est une énergie verte. • Bas frais d'exploitation (aucun carburant). • Aucune pièce mobile. • Opérationnelle en température ambiante. • Fiabilité élevée dans des modules (>30 ans). • Modulaire (petits ou grands). • Installation rapide. • Peut être intégré dans des fondations nouveau ou existant. • Peut être installé presque en tout point de fonctionnement. • La crête de rendement quotidien peut assortir une demande locale. • Acceptation publique élevée. • Ne présente pas de danger (côté sécurité) 	<ul style="list-style-type: none"> • La source de carburant est diffuse (la lumière du soleil est une énergie relativement à basse densité). • Coûts élevés d'installation. • Problème d'ombrage partiel. • Une fiabilité basse des éléments auxiliaires (les batteries de stockage). • Manque d'intégration et d'installation de système dans le commerce répandu. • Manque de stockage de l'énergie efficace et économique.

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques

I.4.1.2 Energie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement, ce qui crée un mouvement de l'atmosphère ou le vent. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse ; cette dernière est mesurée par des anémomètres, classée selon l'échelle Beaufort en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau (I.2) [Gou_82].

Degré Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (Km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	<1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau I.2. Échelle Beaufort.

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, depuis une dizaine d'années, l'énergie éolienne maintient une croissance de 30% par an [Mir_05]. Elle peut satisfaire 12% de la demande d'énergie mondiale en 2020 [Wai_07].

a) Types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [Gou_82][WAL_97] :

- les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- les turbines éoliennes à axe vertical.

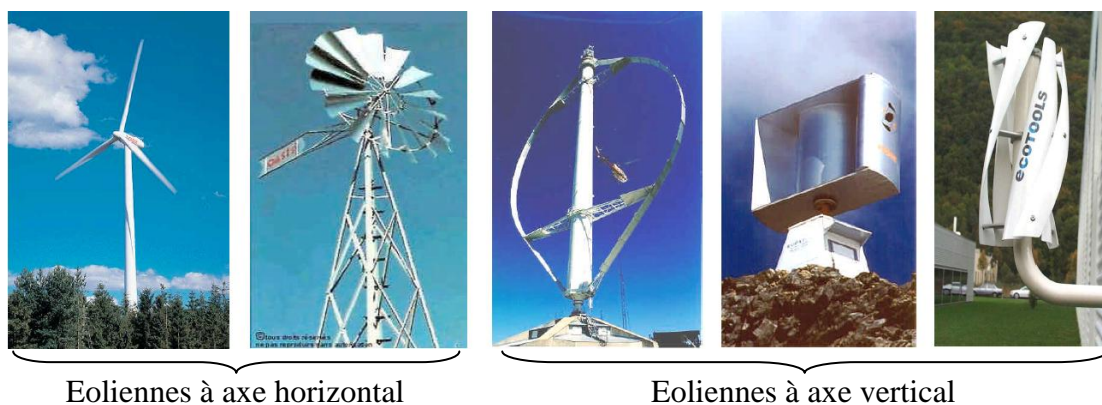


Figure I.5. types d'aérogénérateurs

Le graphique de la Figure (I.6) donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels (qui caractérisent l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne) en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types d'éoliennes :

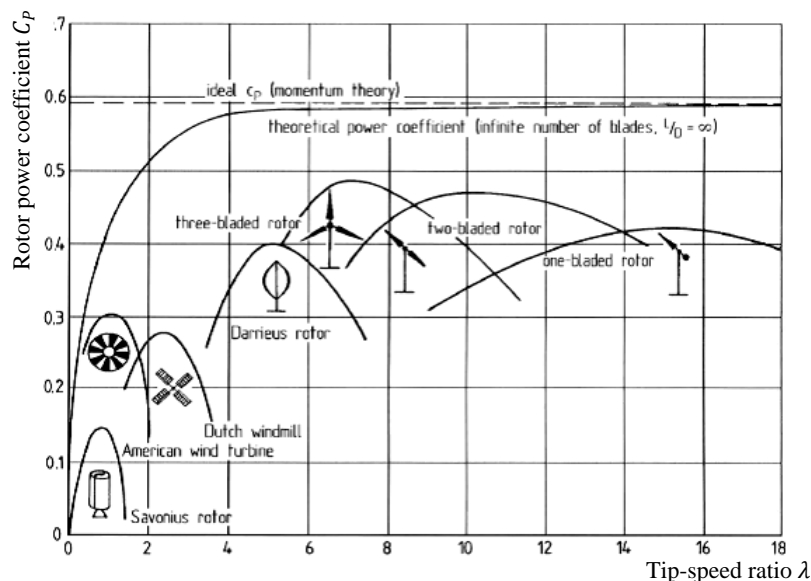


Figure I.6. Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée pour différents types de turbines [Hau_00].

Axe horizontal (Horizontal Air generator Wind Turbine)

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement [Vec_05] [Asc_03]. Elles peuvent être classifiées suivant leur vitesse ; lentes et rapides.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement [Gou_82].

Axe Vertical (Vertical Airogenerator Wind Turbine)

Une autre famille d'éoliennes est basée sur les voilures à axe vertical. Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT: les turbines Darrius classiques, les turbines Darrius à pales droites (H-type), et la turbine de type Savonius [Mir_05].

b) Eolien à vitesse variable

L'importance du réglage de la vitesse variable de l'éolien se voit directement à travers les courbes représentant la puissance en fonction de la vitesse de rotation, pour différentes vitesses du vent, comme montré dans la figure (I.7). Si on suit la courbe optimale, qui relie les sommets de la puissance, continuellement en changeant la vitesse de l'éolienne, la puissance recueillie sera toujours maximale.

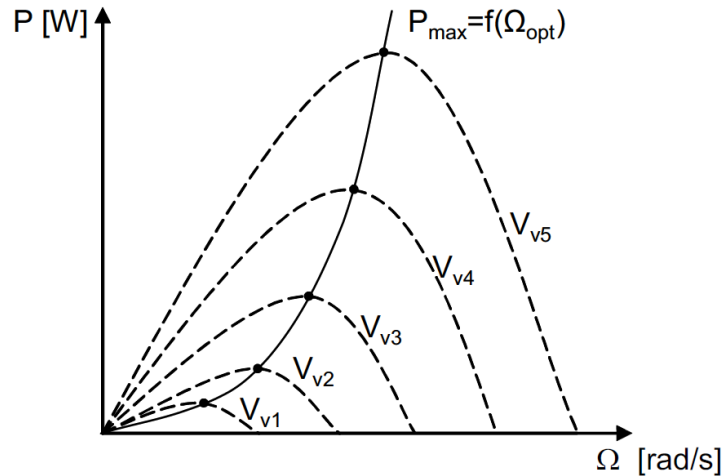


Figure I.7. Caractéristique Puissance-vitesse de rotation d'une éolienne

Pour aboutir à optimiser la puissance éolienne dans le but de maximiser l'énergie captée, deux types de régulation sont utilisés, mécanique et électrique. Les régulations mécaniques se résument en trois systèmes pour les grandes éoliennes [Vec_05] :

- Système Pitch ou à angle de calage variable ;
- système Stall ou à décrochage aérodynamique ;
- et système Stall actif ou à décrochage aérodynamique actif,

et un système de calage des pales ou d'orientation face au vent pour les petites éoliennes.

Les méthodes de régulations électriques utilisent des techniques de poursuite du point de puissance maximale (dites MPPT), appliquées sur les convertisseurs d'énergies électriques. Ces techniques font varier la vitesse de rotation de la génératrice à travers le convertisseur, afin de maximiser la puissance éolienne, ou bien de garder le coefficient de puissance C_p maximum [Hex_09]. Plusieurs techniques MPPT sont développées dans la littérature [Mol_06][Jia_02][Dat_03][Qin_08][Wai_07], elles varient suivant l'architecture de la chaîne de conversion électrique.

c) Chaines de conversion électriques éolienne

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la

génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertie en énergie électrique à travers un convertisseur d'énergie électrique.

Dans la littérature, plusieurs classifications de la chaîne de conversion électrique sont établies, en se basant sur plusieurs critères, on cite :

La puissance de l'éolienne : une classification des éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent est établie dans [Gou_82]. Les éoliennes qui fournissent moins de 40 KW sont les petites éoliennes, et celle qui dépassent le 1MW sont les grandes. Les éoliennes qui délivrent une puissance comprise entre les deux dernières limites sont considérées comme des moyennes éoliennes.

Le fonctionnement couplé ou non au réseau électrique : dans le premier cas, plusieurs structures existent pour raccorder l'éolien (les grands éoliens) au réseau [Bau_00]. Elles peuvent être bien adaptées à des systèmes de puissance modérée et certaines peuvent regrouper non seulement les turbines éoliennes mais plusieurs types de sources.

Pour les sites isolés, l'énergie éolienne peut être très utile en fonctionnant seule, ou associée à un groupe électrogène ou à un générateur photovoltaïque. Des batteries de stockage sont souvent nécessaires dans ce cas pour stocker de l'énergie à travers un convertisseur d'énergie électrique, et un bus continu [Sam_08].

Le fonctionnement à vitesse fixe ou variable : En fonctionnant à vitesse fixe, la génératrice électrique est directement couplée au réseau, elle est entraînée par la turbine à travers un multiplicateur mécanique de vitesse. La vitesse est sensiblement constante, et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse du vent [Vec_05].

L'insertion de convertisseurs électriques entre la génératrice et le réseau permet le découplage de la vitesse de rotation de la génératrice ; de la fréquence du réseau, et ainsi de faire fonctionner l'éolienne à vitesse variable. Avec ce fonctionnement, plusieurs méthodes MPPT peuvent être appliquées. Elles font varier la vitesse de rotation directement ou indirectement, afin d'optimiser le rendement de l'éolienne. La plus part des nouvelles éoliennes sont conçues pour fonctionner à vitesse variable [Mul_02].

La génératrice : le choix de la génératrice repose sur plusieurs critères (Puissance, type et dimension de la voilure, mode de raccordement au réseau...).

- Les machines asynchrones (MAS) sont les machines les plus répandues, elles représentent le choix par excellence, à cause de son prix et robustesse. Elles sont souvent utilisées dans les grandes éoliennes, où la vitesse est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse entre la turbine et la génératrice. Environ 85% [Mir_05] de ces applications en éolien sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique.

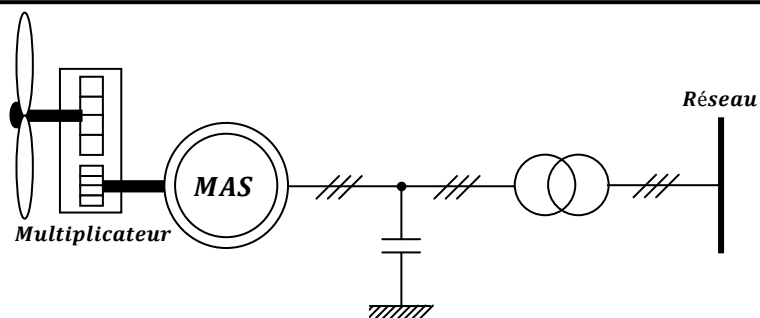


Figure I.8. Chaîne de conversion à génératrice asynchrone fonctionnant à vitesse fixe.

- La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est la machine la plus utilisée dans le domaine des systèmes éoliens connectés au réseau [Xue_04]. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement.

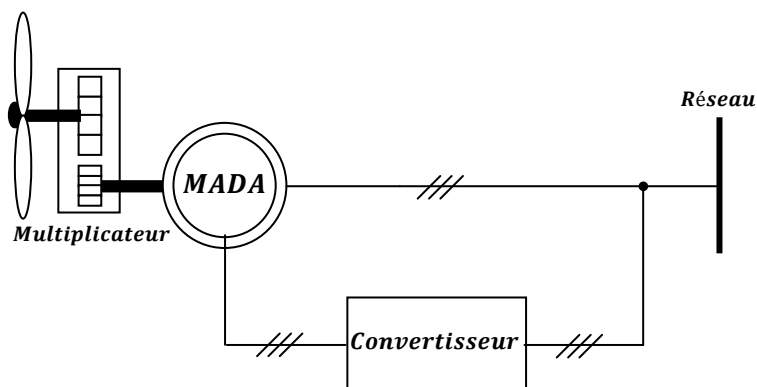


Figure I.9. Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à double alimentation.

- En utilisant les machines synchrones, on élimine les problèmes du multiplicateur mécanique (siège de perte de puissance et source de bruit). Elles sont les mieux adaptées pour les systèmes d'entrainements directs, et connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par le convertisseur. Leur inconvénient majeur réside dans l'entretien régulier de système des bagues et balais.

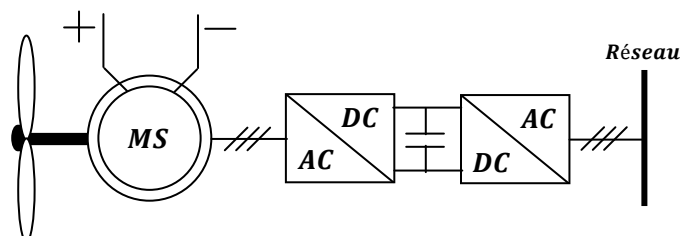


Figure I.10. Chaîne de conversion à générateur synchrone et convertisseurs de fréquence

Pour surmonter les problèmes du système des bagues et balais, et pour des raisons de compacité et de rendement ; les génératrices synchrones à aimants

permanents apparaissent avec le développement des matériaux magnétiques. Dans les applications éoliennes, ces systèmes ont un taux de défaillance très réduit, grâce à la suppression du multiplicateur de vitesse [Hao_09] et du système de bagues et balais. Leur vitesse de rotation est différente à celle liée à la fréquence du réseau d'où l'obligation de la présence de l'électronique de puissance. Cette dernière permet une régulation simple de la vitesse de rotation, et donc une optimisation efficace de la puissance éolienne.

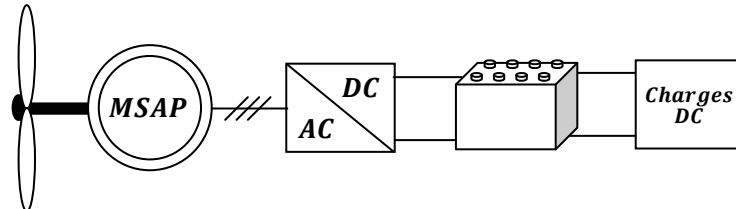


Figure I.11. Eolienne basée sur une génératrice à aimant permanent débitant directement sur des batteries.

I.4.1.2. Energie solaire thermique

Le soleil est non seulement une condition pour l'existence de la vie sur la Terre, mais aussi une source énergétique inépuisable, qui puisse être disponible encore cinq milliards d'années. L'émission solaire peut être utilisée, aussi bien passivement, qu'activement. Par l'utilisation passive de l'énergie solaire on peut diminuer la consommation de chaleur et de lumière artificielle dans une maison donnée. Cela peut être réalisé par une orientation au sud et une construction respectueuse du corps de maison, ainsi que par une disposition convenable des surfaces vitrées.

En utilisant activement l'énergie solaire thermique, on applique des moyens et des composants techniques auxiliaires. Avec les installations thermiques solaires, on obtient la chaleur à l'aide de collecteurs. La production d'eau chaude sanitaire est parmi les applications de l'utilisation de cette énergie renouvelable.

a) Système de production d'eau chaude sanitaire

La plus grande partie des installations thermiques solaires sont utilisées pour le chauffage de l'eau de consommation et éventuellement pour l'aide au chauffage des locaux. Le marché le plus important pour ce type d'installations ce sont les maisons (une ou deux familles). Les installations solaires sont composées en général des éléments suivants :

- Capteur thermique (collecteur),
- conduites (système de conduite),
- station solaire avec bloc de commande,
- réservoir accumulateur et échangeur de chaleur.

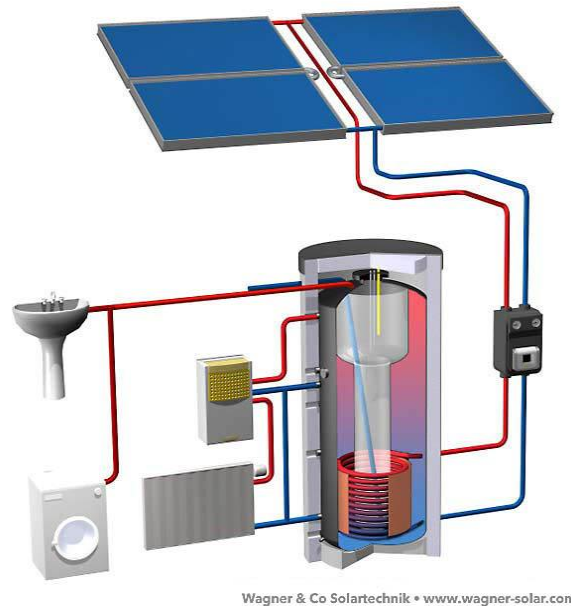


Figure I.12. Installation de production d'eau chaude sanitaire.

La chaleur du collecteur est acheminée par la conduite jusqu'au réservoir d'eau bien isolé. Un mélange antigel d'eau et de glucole sert de fluide caloporteur. Un échangeur de chaleur sépare le circuit fermé de circulation du collecteur, du réservoir accumulateur solaire qui est plein d'eau. La station solaire assure, grâce à une pompe à dispositifs de protection et à bloc de commande, le fonctionnement correct de l'installation solaire à tous les régimes de travail. La partie supérieure du réservoir accumulateur, peut être chauffée, en plus, jusqu'à la température désirée de l'eau, à l'aide d'une chaudière de chauffage pour que l'alimentation soit toujours garantie.

De nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer les performances énergétiques des installations solaires (Buzas et al,1998) [Buz_98];(Knudsen et al, 2004) [Knu_04]; (Mokhtari et al, 2006) [Mok_06]; (Essen et al 2004) [Ess_04]; (Mohsen et al, 2002)[Moh_04].

b) Les capteurs thermiques

Les capteurs thermiques (figure I.13) transforment l'énergie portée par le rayonnement solaire en énergie thermique sous forme de chaleur et la transmettent à un fluide caloporteur [Duf_91]. Deux types de collecteurs existent. Les collecteurs plats et les collecteurs à tubes sous vide. Dans les deux cas, les capteurs sont montés sur un support incliné ou un toit face au sud et sont raccordés à un réservoir de stockage.

Les collecteurs plats sont composés d'une tôle conductrice de chaleur avec des tubes intégrés (absorbeur), d'une couverture frontale en verre et d'une isolation thermique de la paroi inférieure et des parois latérales. Le principe de fonctionnement du collecteur est le suivant : Les ondes courtes des rayons du soleil pénètrent par le

verre et arrivent dans le collecteur, puis se transforment en un rayonnement d'ondes longues (chaleur) ne pouvant être émis que partiellement vers l'extérieur.

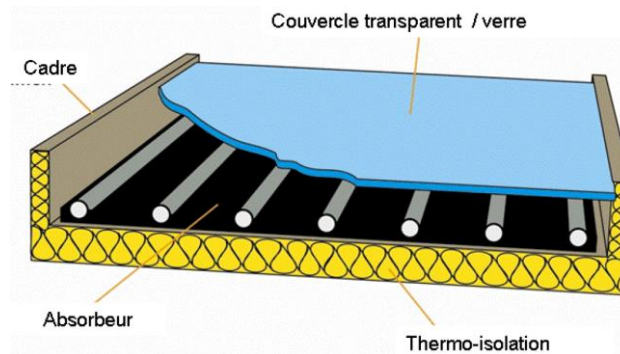


Figure I.13. Construction typique d'un collecteur plat

d) Les transferts d'énergie dans le chauffe-eau solaire

L'énergie captée par le collecteur solaire est transformée en chaleur est cédée au fluide caloporteur puis transférée vers un réservoir de stockage. Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée [Tou_05] [Tou_09].

- **Transfert par circulation naturelle de l'eau :** Dans ces installations, le transfert d'énergie est basé sur la plus faible densité de l'eau chaude qui confère à celle-ci un mouvement ascendant.

- **Système direct avec thermocirculation et appoint dans ou hors de stockage :** Dans ce cas, le chauffe-eau possède deux circuits : l'un dit "primaire" contient l'eau qui est chauffée dans le capteur tandis que le circuit "secondaire" est alimenté par l'eau sanitaire à réchauffer. Un appoint (résistance électrique ou apport quelconque de chaleur via un échangeur) peut être intégré dans la partie supérieure du stockage alors que l'eau chaude solaire en occupe la partie basse.

- **Transfert par circulation forcée :** L'installation utilise ici, en plus des éléments existants dans les systèmes précédents, une pompe de circulation commandée par une régulation de température. Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbant vers le réservoir de stockage.

I.4.2. Convertisseurs électriques (éléments de gestion)

Dans une maison à énergie positive, des convertisseurs sont utilisés pour optimiser et stabiliser l'énergie et pour transformer le courant continu en courant alternatif et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans de tels systèmes : les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs.

I.4.2.1. Les hacheurs (convertisseur DC/DC)

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue du départ peut être fournie à un réseau alternatif redressé et filtré. Une batterie d'accumulateurs assure une alimentation stabilisée.

On distingue deux types de convertisseurs continu-continu. Ceux qui sont non isolés, et ceux qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, (cas des alimentations de PC...) [Cou_05]. Dans les convertisseurs non isolés, on peut faire une autre distinction. Les hacheurs réversibles et les hacheurs non réversibles.

Les hacheurs non réversibles, sont ceux qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge. On distingue :

- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$.
- Les éleveurs (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$.
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, le FLYBACK, SEPIC, CUK, et le FORWARD.

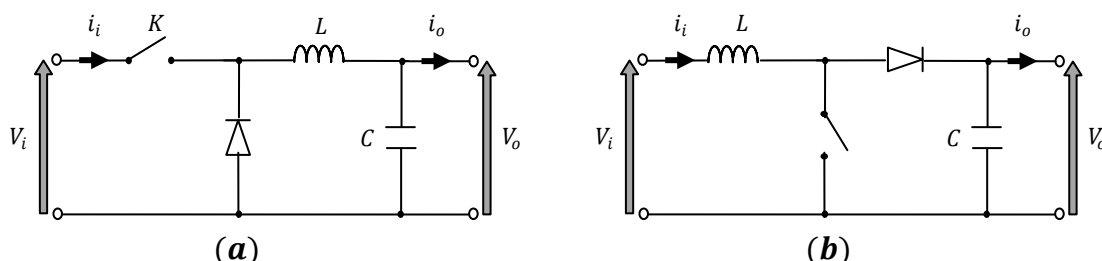


Figure I.14. Schéma de principe d'un hacheur : (a) abaisseur (b) éleveur.

Contrairement aux hacheurs non réversibles, ni en tension, ni en courant, où l'énergie va toujours de la source vers la charge. Dans les hacheurs réversibles, une source peut devenir une charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes électriques. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir générateur, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (plus astucieux qu'un simple freinage mécanique).

Selon le type de conversion, tension ou courant, on distingue trois types de hacheurs réversibles :

- Les hacheurs réversibles en courant.
- Les hacheurs réversibles en tension.
- Et les hacheurs réversibles en tension et en courant.

I.4.2.2. Les onduleurs (convertisseur DC/AC)

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs statiques qui servent principalement à alimenter, à fréquence fixe ou variable, des charges alternatives. Le but recherché est l'obtention pour chaque tension de sortie d'une forme d'onde approximant au mieux la sinusoïde.

L'onduleur est dit autonome si l'établissement et la connexion entre l'entrée et la sortie ne dépendent que de la commande des semi-conducteurs [Dou_09].

On distingue deux types d'onduleurs :

- Les onduleurs autonomes de tension : sont alimentés par une source de tension continue, d'une impédance interne négligeable et de tension constante peu affectée par les variations du courant qui la traverse.
- Les onduleurs autonomes de courant sont alimentés par une source de courant.

Dans les onduleurs de tension. On distingue :

- Les onduleurs monophasés ; en pont et en demi-pont, qui sont destinés à alimenter des charges alternatives monophasées de faible puissance.
- Les onduleurs triphasés ; ils couvrent la gamme de moyenne et de forte puissance. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [Esp_01].

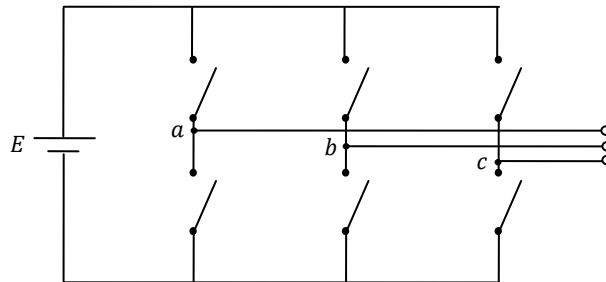


Figure. I.15. Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension

Le domaine d'application des onduleurs de tension peut être caractérisé par la variation de la fréquence. On distingue deux grandes familles [Foc_98]:

- **Le domaine des fréquences fixes :** où l'onduleur de tension est destiné à palier les défaillances, ou même l'absence d'un réseau alternatif en recréant la tension correspondante à partir d'une source de tension continue. Cette application requiert généralement la fourniture d'une tension de sortie très pure, donc sans les harmoniques de découpage, d'où la nécessité d'un filtre de sortie.
- **Le domaine des fréquences variables :** dans ce cas, l'onduleur est généralement alimenté par un réseau alternatif à travers un redresseur et un filtre d'entrée. L'application la plus connue est celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

I.4.2.3. Les redresseurs (convertisseur AC/DC)

Les montages redresseurs, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [Lar_04].

On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin du continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Suivant la possibilité d'ajuster la tension de sortie, deux grandes familles de redresseurs peuvent être distinguées [Cou_xx]:

- Les redresseurs non commandés, ou redresseurs à diodes, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.
- Les redresseurs commandés, ou redresseurs à thyristors, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes.

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur. Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur.

On distingue trois types de montages [cou_xx] :

1. **Pq** : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;
2. **PDq** : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;
3. **Sq** : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

La figure (I.16) donne le schéma électrique des montages P3, PD3 et S3. Ces trois montages sont le plus communément utilisés pour le redressement de tensions triphasées.

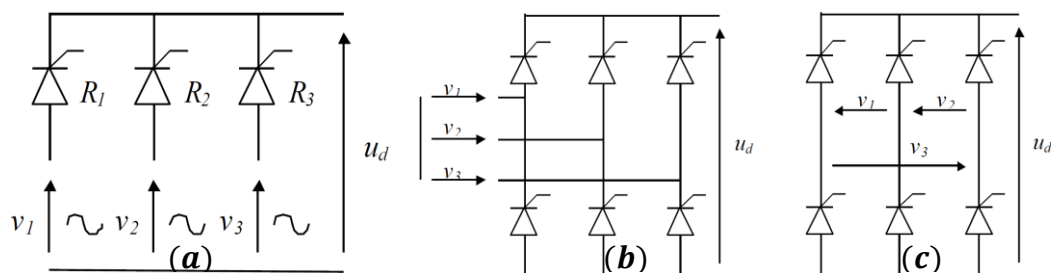


Figure I.16. Redresseurs triphasés : (a) P3, (b) PD3, (c) S3.

I.4.3. Système de stockage

En fonction de la consommation journalière de l'énergie, avec ses creux et ses pointes, on utilise depuis fort longtemps des installations de stockage pour répartir quelque peu la production continue. Elles sont très utiles dans de nombreuses applications électriques. Les maisons à énergie positive sont l'une de ces applications. Ces installations se diffèrent suivant la stratégie de stockage.

La stratégie de stockage à court terme « Peak Shaving Strategy » [Pip_04], permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et/ou de la charge. Elle est généralement utilisée pour les sites connectés aux réseaux. Par contre, la stratégie de stockage à long terme « Cycle Charge Strategy » [Pip_04], est utilisée généralement dans les sites isolés pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue.

Pas tous les types d'énergies peuvent être stockés d'une manière efficace, et en quantité importantes [Hai_06]. L'énergie solaire thermique peut être stockée sous forme d'eau chaude dans un réservoir d'eau isolant dans les systèmes de production d'eau chaude sanitaire, ou à travers les murs et les fenêtres qui permettent de stocker de la chaleur pour la restituer pendant la nuit.

Différents moyens de stockage peuvent être utilisés dans les maisons à énergie positive. Les technologies les plus développées sont les accumulateurs électrochimiques, les volants d'inertie et les super condensateurs [Vec_05]. L'utilisation des batteries électrochimiques est très répandue et en plein essor, notamment avec le développement du véhicule électrique [Fau_88]. Les grandes familles d'accumulateurs disponibles sont actuellement celles au plomb acide et au sodium à électrolyte d'alumine (NaS) [Nou_05]. Les batteries au plomb acide sont la solution la plus rentable mais elles ont des cycles de vie limités, des densités énergétiques basses et de faibles rendements [Dal_06][Rib_01]. En plus, un convertisseur DC/AC est indispensable pour interfacer une batterie avec un système à courant alternatif, car elle stocke le courant continu.

I.4.4. Le système de commande et de supervision

Vu le caractère aléatoire des conditions climatique (la température ambiante, l'éclairage et la vitesse du vent) et de la consommation, un ajustement en temps « réel » est nécessaire, pour optimiser les transferts d'énergie de générateurs PV et d'éolien. Ainsi, les chargeurs de batteries, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Le bus continu doit aussi maintenir une tension stable à ses bornes, cela est assuré par les batteries, à travers la commande d'un convertisseur d'énergie intercalé entre les deux.

La tension sinusoïdale assurée par l'onduleur, après le bus continu, doit répondre à certaine norme. Le système de commande veille pour que l'amplitude, la fréquence et le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension aux bornes de la charge soit normatif, pour ne pas détériorer les appareils domestiques, et pour diminuer la pollution dans le réseau électrique en cas d'injection de l'énergie.

Le système de commande et de supervision control aussi la température d'eau chaude domestique, en commandant le débit du fluide caloporteur qui circule dans la collecteur. Cela se fait en agissant sur une pompe, située entre le collecteur et le réservoir de stockage d'eau chaude ; ainsi que la température de la maison si on exploite la chaleur de l'eau produite. Ceci contribue à aider le chauffage de la maison à travers un chauffage auxiliaire, et une pompe.

Pour assurer ces commandes, la maison doit être largement dotée d'instruments de mesures. Des capteurs doivent permettre d'obtenir les conditions météorologiques (la température ambiante extérieure, l'éclairement et la vitesse du vent) ; les températures d'eau d'alimentation du réservoir de stockage, de l'eau chaude et la température ambiante à l'intérieur de la maison. D'autres capteurs doivent transmettre les mesures de courants et les tensions au niveau de : la chaîne de production photovoltaïque, la chaîne de production éolienne, les batteries, le bus continu et le réseau.

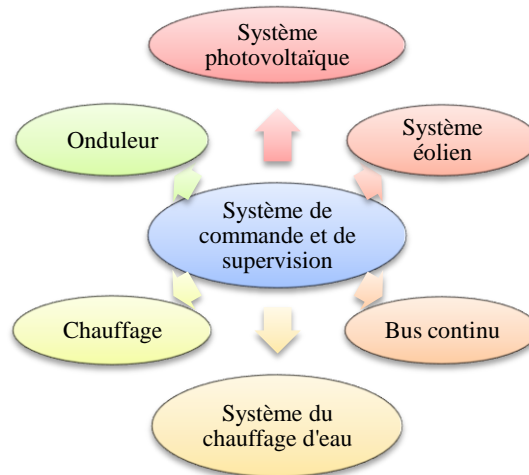


Figure I.17. Schéma synoptique de système de commande et supervision

I.4.5. Charges

Les charges sont les éléments consommateurs de puissance électrique d'un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge [Hai_06]. Il existe des charge à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules d'éclairage, les chauffages électrique, les chauffe-eaux etc. les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de la puissance réactive. Des charges à courant continu peuvent exister dans une maison, ils peuvent aussi avoir des composants inductifs [Vec_05].

I.5. Maison à énergie positive et l'être humain

Les prix élevés des matériaux de construction utilisés pour les maisons à énergie passive, ainsi que la difficulté rencontrée pour trouver des sites réunissant toutes les conditions à leur construction, sont les principales raisons qui déplaisent aux entreprises de BTP. Les constructeurs préfèrent construire des maisons « normales » qui sont plus rentables.

De plus, les « maisons vertes » et autres maisons à bilan énergétique positifs sont parmi les plus chères du marché, et attirent pour l'instant des catégories de clients très particuliers : architectes, ingénieurs, particuliers au revenu élevé [Yas_09].

Le principal risque, en courant vers les maisons à énergie positive, c'est de réaliser des maisons dont le bilan est positif seulement parce qu'elles produisent plus que ce qu'elles consomment ! Il ne faut pas concevoir une maison qui produit un maximum d'énergie, mais un compromis entre production d'énergie propre et économies d'énergie est nécessaire.

I.6. Conclusion

Cette partie nous a permis de clairement identifier les enjeux, les objectifs et les caractéristiques des maisons performantes. A travers leurs concepts, on a pu comprendre celui de la maison à énergie positive, et par la suite de le définir.

Les techniques utilisées dans ce type de maisons ont été discutées dans ce chapitre. L'intégration des énergies renouvelables dans ces maisons est indispensable pour apporter le gain en énergie. On a étudié, par la suite, la conception de la maison à énergie positive proposée dans ce travail.

Pour réaliser des maisons dont le bilan est positif, on doit économiser la consommation d'énergie, et optimiser l'énergie produite. Pour réaliser ce dernier but, une connaissance de la dynamique des différents composants de la maison est indispensable. Plusieurs logiciels de simulation ont été conçus pour analyser ce type des maisons (EnergyPlus, HOMER, RETScreen International, DER-CAM, HYBRIDS, etc.) [Enr_08]. La maison à énergie positive proposée va être modélisée dans le prochain chapitre.

Chapitre II :

Modélisation des Composants de la Maison à Energie Positive

II.1. Introduction

Les maisons à énergie positive utilisent différentes sources d'énergie et un système de stockage interconnectés entre eux à travers des convertisseurs. L'architecture de la maison proposée inclut un système de conversion photovoltaïque, et un autre éolien, connectés entre eux avec des batteries à travers un bus continu et des convertisseurs de puissance. La tension continue du bus est convertie en alternative par un onduleur triphasé, et puis lissée par un filtre LC. La maison proposée contient aussi un système de production d'eau chaude sanitaire, destinée à l'exploitation domestique et qui peut servir pour le chauffage.

Pour étudier le comportement dynamique du système complet, une modélisation de chaque élément est indispensable. Dans ce chapitre, on a fixé l'architecture détaillée de la maison proposée. Elle est représentée dans la figure (II.1). En suite, On a modélisé chaque élément de cette architecture. Et à la fin, un modèle d'une chambre de la maison a été établi afin d'étudier la possibilité de commander la température de cette chambre à travers un chauffage auxiliaire.

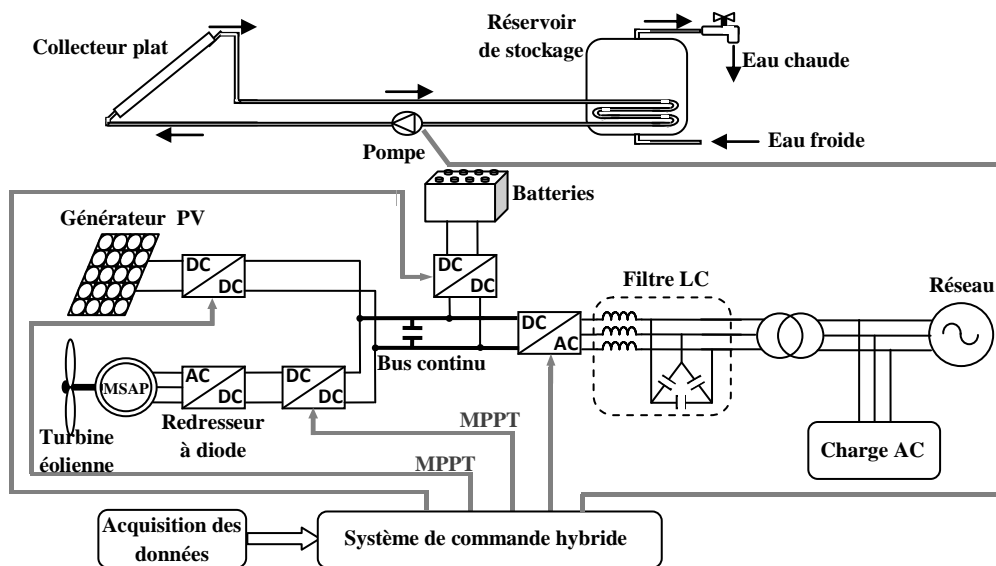


Figure II.1. Architecture de la maison à énergie positive proposée.

II.2. Modélisation de la chaîne photovoltaïque

Le but de cette section est de décrire les modèles mathématiques des composants du système de conversion photovoltaïque. Le schéma bloc de la chaîne de conversion photovoltaïque étudiée dans le cadre de ce travail est présenté dans la figure (II.2). Il s'agit d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur DC/DC de type Buck-Boost muni d'une commande MPPT, pour maximiser l'énergie photovoltaïque.

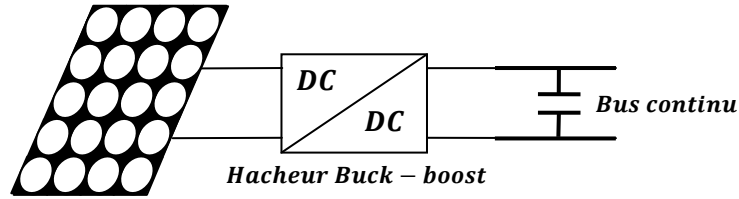


Figure II.2. Schéma bloc de la chaîne de conversion photovoltaïque

II.2.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Il est réalisé par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires). La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier.

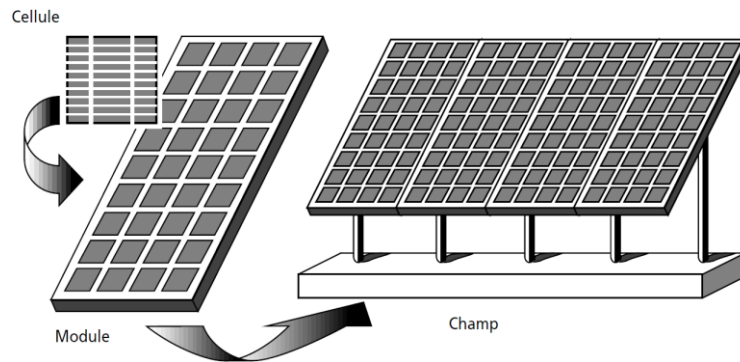


Figure II.3. Composantes d'un générateur photovoltaïque [pompage PV].

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles du générateur photovoltaïque. Ces modèles décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement. La différence entre ces modèles se situe dans la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la caractéristique tension-courant.

Le modèle utilisé dans ce travail se base sur le modèle proposé dans les travaux de (A.Bellini et al 2006) [Arm_09]. C'est un modèle simplifié, exacte et amélioré des modules photovoltaïque qui ne demande aucune méthode numérique. En plus il fait appelle seulement aux paramètres fournis par les constructeurs dans les fiches techniques des modules photovoltaïques.

L'expression du courant d'un module photovoltaïque I_p en fonction de la tension de sortie du module V_p est donnée par l'équation suivante :

$$I_p = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\left(\frac{V_p}{C_2 V_{oc}} \right)} - 1 \right) \right] \quad (II.1)$$

Ou C_1 et C_2 sont deux constantes données par :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{sc}} \right) e^{\left(\frac{-V_{MPP}}{C_2 V_{oc}} \right)} \quad (II.2)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_{MPP}}{V_{oc}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{sc}}\right)} \quad (II.3)$$

L'équation (II.1) représente l'équation de la caractéristique $I - V$ de la cellule à une température et à un éclairement de référence, par exemple $25^\circ C$ et $1000 W/m^2$. Si l'éclairement et la température varient, le point (I_{MPP}, V_{MPP}) de la courbe de référence se translate en un autre point (I_n, V_n) tel que :

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta I = \alpha \left(\frac{L}{L_{ref}}\right) \Delta T + \left(\frac{L}{L_{ref}} - 1\right) I_{sc} \\ \Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \end{cases} \quad (II.4)$$

Et

$$\begin{cases} V_n = V_{ref} + \Delta V \\ I_n = I_{ref} + \Delta I \end{cases} \quad (II.5)$$

La courbe défini par l'équation (II.1) se translate elle aussi et sera définie par l'équation :

$$I_{n(V_n)} = I_{p(V_n - \Delta V)} + \Delta I \quad (II.6)$$

$$I_p = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\left(\frac{V_p - \Delta V}{C_2 V_{oc}}\right)} - 1 \right) \right] + \Delta I \quad (II.7)$$

La nomenclature des paramètres est donnée comme suit :

α et β sont les coefficients de température du courant et de la tension respectivement.

L et L_{ref} sont l'ensoleillement et l'ensoleillement de référence (W/m^2), respectivement.

T et T_{ref} sont respectivement la température et la température de référence de la cellule ($^\circ C$).

I_{sc} et I_{MPP} sont respectivement les courants de court circuit et de puissance maximale.

V_{oc} et V_{MPP} sont respectivement les tensions de court circuit et de puissance maximale.

R_s est la résistance série (Ω).

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque composé de N_s modules en série, dans une branche et de N_p branches en parallèle, seront : $N_s N_p P_p$ pour la puissance, $N_s V_p$ pour la tension, $N_p I_p$ pour le courant et $R_s N_s / N_p$ pour la résistance série tels que P_p, V_p, I_p et R_s sont relatifs au module. Ce qui donne le modèle mathématique du générateur photovoltaïque [**Ric_97**].

Les figures (II.4 et II.5) montrent les résultats de simulation du modèle de cellules **SOLAREX SX 110** (module de 40 cellules en série) dont les paramètres sont cités dans l'Annexe I.

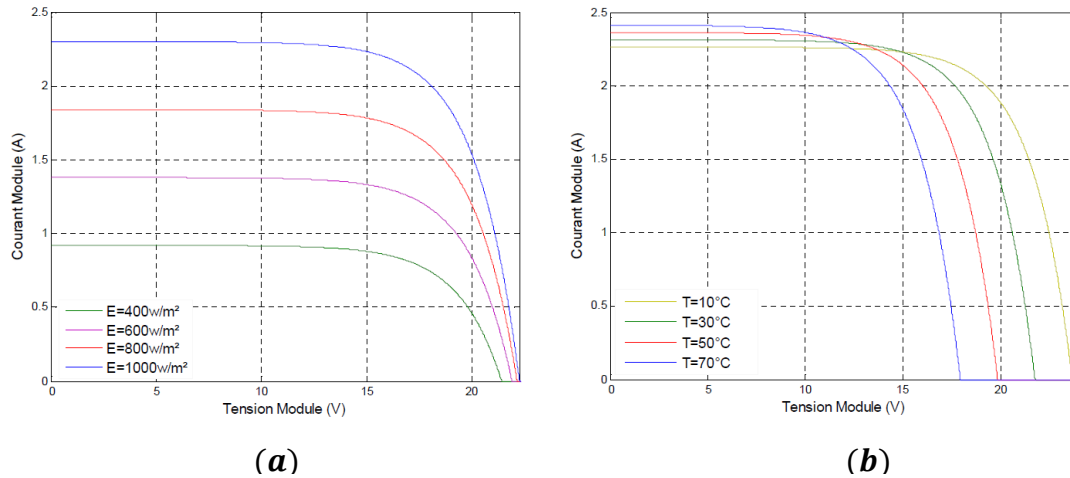


Figure II.4 : Caractéristique courant-tension du panneau solaire SOLAREX SX 110 pour différents: (a) ensoleillements, (b) températures.

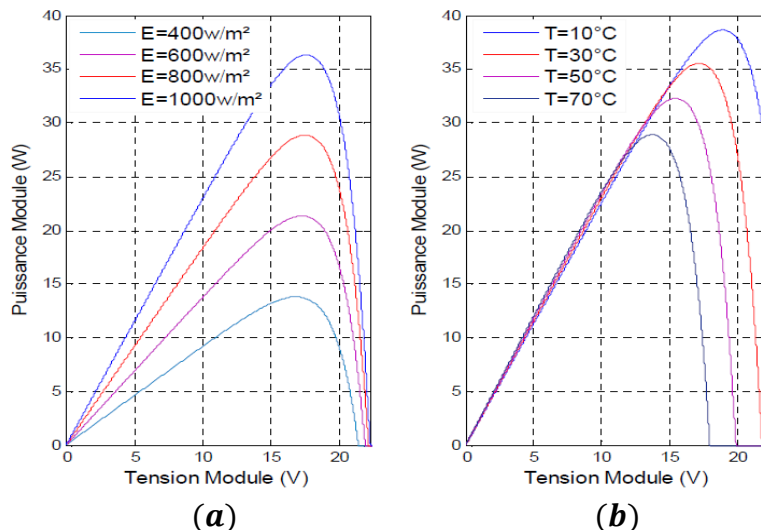


Figure II.5 : Caractéristique P-V pour : (a) différent éclairment, (b) différentes températures.

II.2.2. Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost »

Le hacheur dévolteur/survolteur, souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck-Boost, est un convertisseur qui a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types de hacheur le survolteur « Boost » et le dévolteur « Buck ». Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée continue. Son schéma de base est illustré par la Figure (II.6).

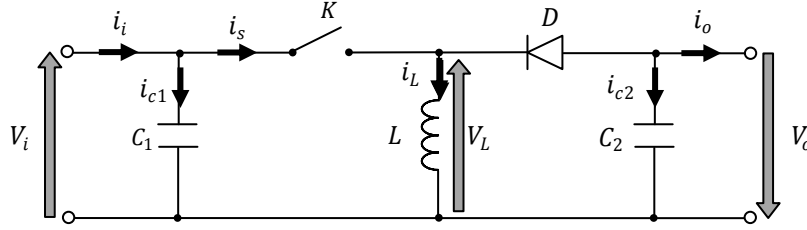


Figure II.6. Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost

L'élément de commande (transistor, thyristor, MOS, IGBT...etc.) est représenté par l'interrupteur K dans le schéma pour ne pas préjuger sa nature.

Pendant le fonctionnement du hacheur, on ferme le commutateur avec un temps de fermeture t_{ON} égal à $d.T_s$, et on l'ouvre dans un temps d'ouverture t_{OFF} égale à $(1 - d).T_s$, où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$ (f_s : la fréquence du hachage)
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$).

Le principe de fonctionnement du hacheur Buck-Boost est basé essentiellement sur la position du commutateur K , ouvert ou fermé. Lorsque ce dernier est fermé, pendant la durée t_{ON} c.à.d. $d \in [0, d.T_s]$, la diode est bloquée, tandis que le courant croît linéairement à l'intérieur de l'inductance avec une pente égale à $\frac{V_i}{L}$ ce qui laisse l'inductance stocker d'avantage d'énergie durant tout le temps de la fermeture de K . Lorsque le commutateur s'ouvre durant t_{OFF} c.à.d. $d \in [d.T_s, T_s]$ la diode conduit à travers l'inductance, dans la quelle le courant décroît aussi linéairement avec une pente égale à $\frac{-V_o}{L}$ [Nab_09][Und_99].

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure (II.7).

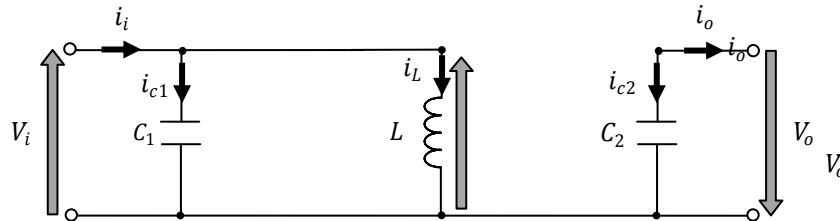


Figure II.7. Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque $d \in [0, d.T_s]$

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (II.8)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparaît à la figure (II.8).

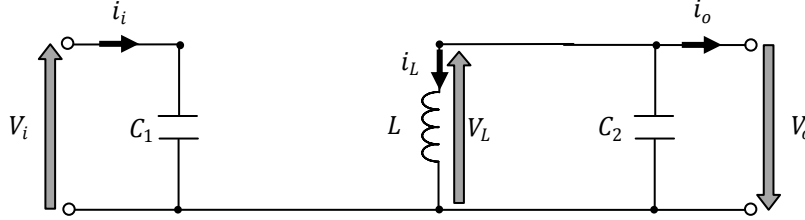


Figure II.8. Circuit équivalent d'un Buck-Boost lors que $d \in [d.T_s, T_s]$

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (II.9)$$

Les systèmes d'équations de base (I.9) (I.10) représentent le convertisseur Buck pour une période dT_s et $(1-d)T_s$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques i_c et V_L est de forme linéaire.

En appliquant cette approche sur les systèmes d'équations (II.8) et (II.9), on trouve le modèle approximé du convertisseur Buck-Boost [4]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_o}{dt} T_s = -dT_s i_o + (1-d)T_s (i_L - i_o) \\ L \frac{di_L}{dt} T_s = dT_s (v_i) + (1-d)T_s v_o \end{cases} \quad (II.10)$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations (II.10) donne :

$$\begin{cases} I_i - dI_L = 0 \\ I_o - I_L = 0 \\ dV_i + (1-d)V_o = 0 \end{cases} \quad (II.11)$$

En utilisant les relations (II.11), on peut calculer le rapport de conversion $M(d)$, défini par :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{d}{1-d} \quad (II.12)$$

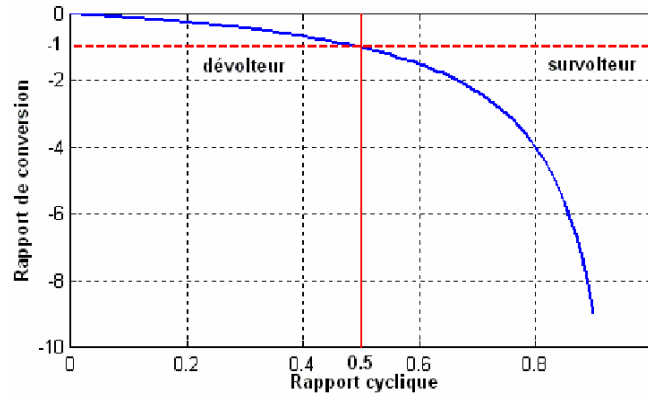


Figure II.9. Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.

II.3. Modélisation de la chaîne éolienne

Dans le cadre de ce travail, l'application de l'éolienne est dans le cadre de l'intégration à l'habitat, donc la production de l'énergie électrique afin de contribuer à satisfaire le besoins d'une maison. Pour cela, la chaîne de conversion éolienne étudiée sera d'une petite puissance, d'une turbine à axe horizontale, à vitesse variable (pour avoir la possibilité de maximiser l'énergie captée) et basée sur une machine synchrone à aimant permanent (MSAP), car c'est la génératrice la plus adéquate pour des tels situations.

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux dispositifs de conversion permettant de transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Dans un premier temps, nous présenterons les deux topologies des chaînes de conversion éolienne basées sur la MSAP, discutées dans plusieurs travaux [Dew_09][Zhe_07][Mir_05], et qui ont fait même l'objectif de comparaison dans [Ngu_08]. Puis, nous allons décrire les modèles mathématiques des différents composants constituant la chaîne de conversion éolienne.

II.3.1. Topologies des chaînes éoliennes basées sur les MSAPs

Le système de conversion d'énergie éolienne proposé est composé d'une turbine éolienne, d'une génératrice (MSAP) et d'un convertisseur AC/DC (redresseur). Il est basé sur des blocs modulaires comme présenté dans la figure suivante :

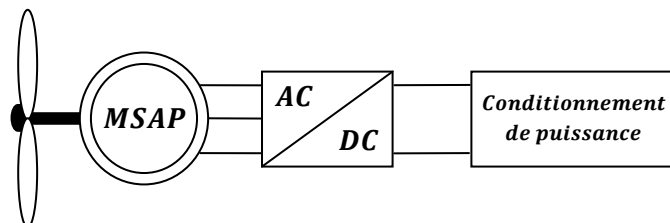


Figure II.10. Système de conversion éolien.

La génératrice Synchrone à aimant permanent est connectée électriquement à un convertisseur AC/DC statique. Ce convertisseur peut avoir une structure qui

dépend des stratégies de recherche du point maximal de puissance. Deux familles de structures ont été développées et discutées dans plusieurs travaux, séparément [Yuf_08][Mol_06], ou ensemble [Dew_09][Zhe_07][Mir_05] :

1. A partir de la structure de redressement MLI à six interrupteurs, et d'un capteur mécanique (vitesse de rotation et position), il est possible d'autopiloter la machine électrique afin de la contrôler en vitesse ou en couple. Cette structure permet différentes stratégies de recherche du point optimal de puissance, notamment celle qui permet de s'abstenir de la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.

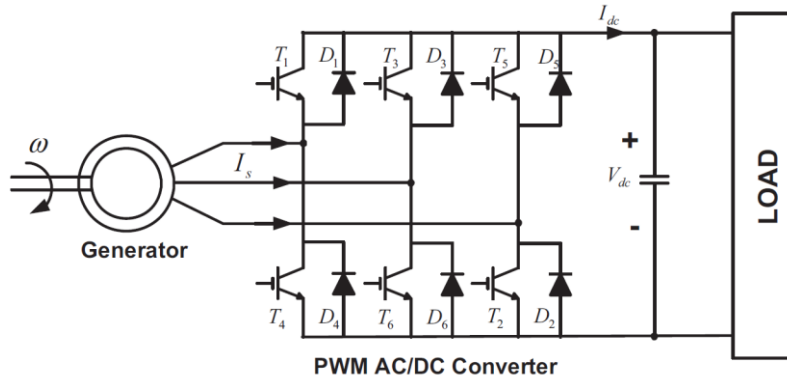


Figure II.11. Topologie d'une chaîne éolienne avec un redressement actif à MLI

2. Un contrôle indirect de la puissance éolienne est possible par l'utilisation d'une chaîne de conversion plus simple et moins coûteuse [Mir_05][Ngu_08], à base de pont de diodes triphasé et d'un hacheur pour adapter la tension continue redressée. Ces structures sont étudiées en considérant que la caractéristique de voilure $C_p(\lambda)$ est connue, sauf si on utilise des techniques qui ne s'intéressent pas au modèle des systèmes, comme les techniques floues.

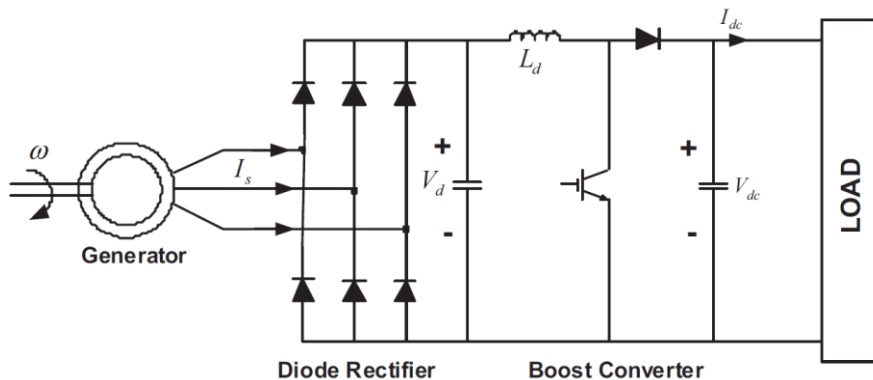


Figure II.12. Topologie d'une chaîne éolienne avec un redressement passif à diodes.

Dans notre travail, on va étudier la topologie à base de pont de diodes triphasé, à cause de sa simplicité et pour optimiser le coût.

II.3.2. Turbine éolienne

La turbine éolienne est un système de conversion d'énergie, qui transforme l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement en énergie mécanique disponible sur l'arbre. Cette énergie cinétique est proportionnelle à la masse d'air qui se déplace à une vitesse donnée. La puissance mécanique extraite du vent est calculée par l'équation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_v^3 \quad (\text{II. 13})$$

où P_m est la puissance extraite du vent [W], ρ est la densité de l'air [kg/m^3], A est la surface balayée par les pales de la turbine [m^2], v_v est la vitesse du vent [m/s] et C_p est le coefficient de puissance. Ce coefficient est en fonction de l'angle de calage β des pales [$^\circ$], et la vitesse spécifique λ défini par :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v_v} \quad (\text{II. 14})$$

où R est le rayon de la turbine éolienne [m] et Ω_t sa vitesse de rotation [rad/s].

Pour modéliser la turbine, la connaissance de la caractéristique C_p , qui dépend des caractéristiques géométrique des pales, est indispensable. Cette expérience peut être obtenue à partir des mesures en soufflerie ou par calcul numérique en utilisant la théorie de l'élément de pale [Vec_05] [Gou_82].

Dans [Xue_04], afin d'utiliser pleinement l'énergie éolienne dans les basses vitesses du vent, la petite turbine tripale à axe horizontal, l'angle de calage est supposé nul ($\beta = 0$). L'expression de la caractéristique C_p en fonction de λ est donnée par [Sam_08]:

$$C_p = 0.000051 \lambda^5 - 0.001539 \lambda^4 + 0.01398 \lambda^3 - 0.03892 \lambda^2 + 0.0469 \lambda + 0.000006 \quad (\text{II. 15})$$

elle est représentée dans la figure suivante, où on remarque que le maximum de la caractéristique est atteint pour $\lambda = 8$.

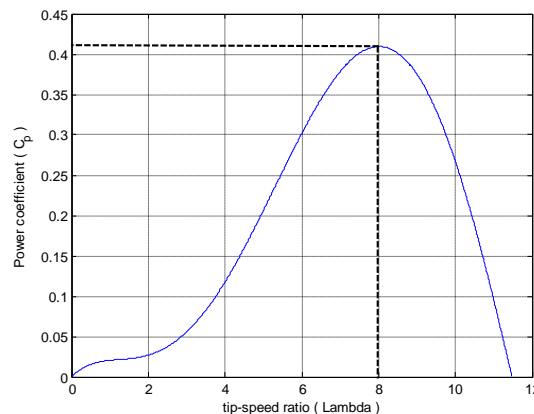


Figure II.13. la caractéristique du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ

II.3.3. Machine Synchrone à Aimant Permanent

Une des pièces maîtresses d'un système de conversion d'énergie dédié à une éolienne est la génératrice [Mir_05]. Pour les applications éolienne de petite puissance, et grâce aux nombreux avantages qu'elle rapporte aux autres types de machines électriques (robustesse, taux de défaillance très réduit, couple massique élevé ...), la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) semble être une bonne candidature pour une utilisation comme génératrice couplé à une turbine éolienne.

La modélisation de la MSAP a déjà fait l'objet de nombreux travaux [Nez_06] [Cha_06]. La machine comporte au stator un enroulement triphasé représenté par les trois axes (A, B, C) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° (figure II.14) et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

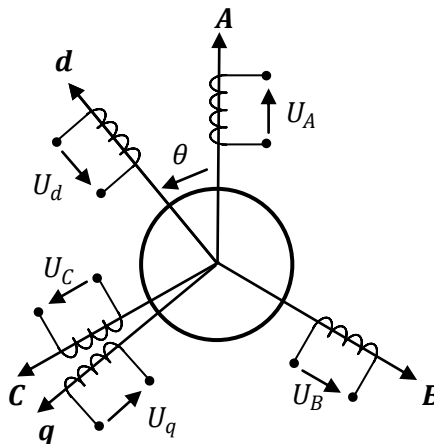


Figure II.14. Référentiel ABC, et Référentiel d-q

Afin de réduire la complexité du modèle non linéaire, nous adoptons des hypothèses simplificatrices usuelles, données dans la majorité des références [Cha_06]: La machine possède une armature symétrique non saturée ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants et une distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements au stator.

En considérant les conditions simplificatrices citées ci-dessus, le modèle triphasé s'exprime par :

$$[V_{ABC}] = [R][I_{ABC}] + \frac{d}{dt}[\lambda_{ABC}] \quad (II.16)$$

tel que : $[V_{ABC}] = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, [I_{ABC}] = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, [\lambda_{ABC}] = \begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$

Avec V_{ABC} : les tensions de phases statoriques,

I_{ABC} : les courants de phases statoriques

λ_{ABC} : les flux totaux produits par les courants statoriques, et

R_s : indique la résistance d'une phase statorique.

Les flux totaux λ_{ABC} sont exprimés par:

$$[\lambda_{ABC}] = [L][I_{ABC}] + [\phi_{ABC}] \quad (\text{II.17})$$

où

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{SS} & M_s & M_s \\ M_s & L_{SS} & M_s \\ M_s & M_s & L_{SS} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec L_{SS} et M_s représentant l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.

ϕ_{ABC} sont les flux rotoriques vus par les enroulements du stator. Ils représentent les amplitudes des flux induits dans les phases statoriques à vide.

La substitution de (II.17) dans (II.16) donne:

$$[V_{ABC}] = [R][I_{ABC}] + \frac{d}{dt} ([L][I_{ABC}] + [\phi_{ABC}]) \quad (\text{II.19})$$

A l'aide de la transformation de Park, qui permet le passage du système triphasé au système biphasé, on peut simplifier l'écriture de nos équations. La transformation de Park s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles, leurs composantes homopolaires, directe et en quadrature [21]. Du point de vue physique, cette transformation est interprétée comme étant une substitution des enroulements immobiles (A, B, C) par des enroulements (d, q) tournant avec le rotor. Cette transformation rend les équations dynamiques des moteurs à courant alternatif plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.

La transformation de Park est définie comme suit:

$$[X_{dq0}] = [K_\theta][X_{ABC}] \quad (\text{II.20})$$

Où X peut-être un courant, une tension ou un flux, et θ représente la position du rotor. Les termes X_d et X_q représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques (courants, tensions ou flux).

La matrice de transformation K_θ est donnée par :

$$[K_\theta] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Dont la matrice inverse K_θ^{-1} a pour forme:

$$[K_\theta]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

En appliquant la transformation (II.21) au système (II.16), on obtient :

$$[u_{dq}] = [K_\theta][V_{ABC}] = [K_\theta][R][I_{ABC}] + [K_\theta] \frac{d}{dt} [\lambda_{ABC}] \quad (\text{II. 23})$$

En suite, en se basant sur (II.22) et (II.19) on obtient:

$$[u_{dq}] = [K_\theta][R][K_\theta]^{-1}[i_{dq}] + [K_\theta][K_\theta]^{-1} \frac{d}{dt} [\phi_{dq}] + [K_\theta] \left(\frac{d}{dt} [K_\theta]^{-1} \right) [\phi_{dq}] \quad (\text{II. 24})$$

Du moment que $[R]$ est diagonale, alors :

$$[K_\theta][R][K_\theta]^{-1} = [R] \quad (\text{II. 25})$$

On a aussi :

$$[K_\theta] \left(\frac{d}{dt} [K_\theta]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 26})$$

et à l'aide de (II.24), on peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle comme suit:

$$[u_{dq}] = [R][i_{dq}] + \frac{d}{dt} [\lambda_{dq}] + P\Omega_r [\hat{\lambda}_{dq}] \quad (\text{II. 27})$$

où :

$$[u_{dq}] = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, [\lambda_{dq}] = \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix}, [\hat{\lambda}_{dq}] = \begin{bmatrix} \lambda_q \\ -\lambda_d \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

et la transformation (II.21) appliquée à (II.17) donne :

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

ϕ_f et P désignent respectivement le flux crée par les aimants au rotor et le nombre de paires de pôles.

L'équation électromécanique est exprimée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \quad (\text{II. 29})$$

avec: f , J et C_r définissant le coefficient d'amortissement, le moment d'inertie du rotor et le couple de charge. Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par:

$$C_{em} = P (\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (\text{II. 30})$$

En développant le système d'équations (II.27) et en se rappelant la relation entre la vitesse mécanique Ω_r et la vitesse électrique ω_r du rotor donnée par : $\omega_r = P\Omega_r$ on peut déduire la forme finale du modèle de la MSAP dans le référentiel $d - q$.

Soit :

$$\dot{x} = f(x) + B u + d C_r \quad (\text{II. 31})$$

Avec x : vecteur d'état choisi pour la modélisation formé du courant direct i_d , courant en quadrature i_q et la vitesse électrique du rotor ω_r .

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i_d \ i_q \ \omega_r]^T, u = [u_d \ u_q]^T = [v_d \ v_q]^T$$

$f(x)$: Champs de vecteur définissant la dynamique non linéaire de la machine.

B : matrice d'entrée.

u : Vecteur de commande composé des tensions exprimées dans le repère de Park.

C_r : étant le couple de charge inconnu.

Tel que :

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} x_1 + \frac{L_d}{L_q} x_2 x_3 \\ -\frac{R_s}{L_q} x_2 - \frac{\phi_f}{L_d} x_3 - \frac{L_d}{L_q} x_1 x_3 \\ \frac{P^2 \phi_f}{J} x_2 - \frac{f}{J} x_3 + \frac{P^2 \phi_f}{J} (L_d - L_q) x_1 x_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{P}{J} \end{bmatrix}$$

II.3.4. Redresseur Triphasé à diodes

Des convertisseurs basés sur des modules entièrement commandés sont coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble être attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées [Mir_05]. L'étude qui suit a donc pour objectif d'évaluer la conséquence du raccordement d'une génératrice éolienne sur un pont de diodes et de fournir des modèles analytiques.

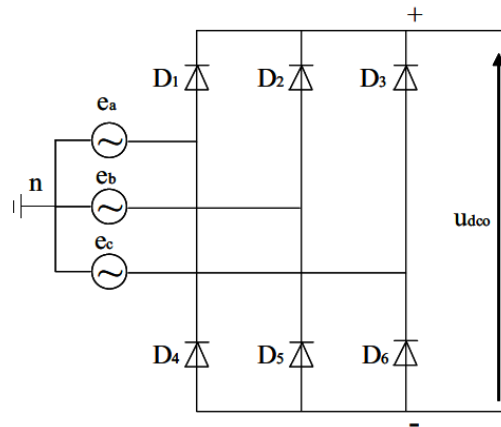


Figure II.15. Schéma d'un redresseur triphasé parallèle double à diode parfait

Le circuit illustré dans la figure (II.15), présente un pont de diodes triphasé parallèle double parfait. La tension redressée U_{dc0} à vide est définie par l'expression suivante :

$$U_{dc0} = \frac{3}{\pi} e_{ab}^{max} \approx 2.34 e_a \quad (II.32)$$

où e_a est la tension efficace par phase.

La figure (II.16) donne les allures des tensions de circuit redresseur parfait.

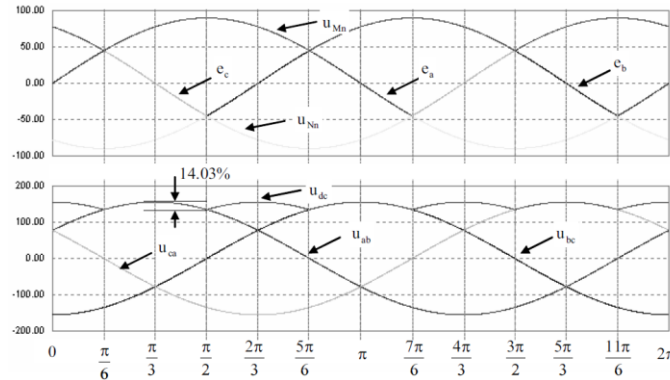


Figure II.16. Tensions simples et angles caractéristiques d'un pont de diode parfait

Dans les circuits réels, des inductances apparaissent des deux côtés du pont de diodes. La commutation des diodes ne peut plus être instantanée à cause de l'énergie accumulée dans les selfs placées côté alternatif [Mir_05].

II.4. Système de stockage électrique

II.4.1. Batterie

Toute batterie est un ensemble des cellules électrochimique capable de stocker l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu [Vec_05]. Les systèmes de batteries sont constitués d'un ensemble des modules de batteries à basse tension/puissance qui se connecte en parallèle ou en série pour obtenir les caractéristiques électriques désirées. Elles représentent les systèmes de stockage qui ont la plus grande capacité de stockage d'énergie électrique. Les batteries le plus utilisées dans les systèmes hybrides sont de type au plomb acide [Dal_06] [Rib_01] [Jos_05].

Il existe une large variété de modèle de batteries dans la littérature [Nos_05] [Gou_09][Oli_07]. Le modèle à utiliser dépendra de l'étude à réaliser et de son objectif. Le modèle le plus simple, idéal (figure II.17), représente la batterie comme une source de tension constante et il ne prend pas en compte les caractéristiques internes de la batterie (la tension ne dépend donc pas du courant fourni) [Hai_06].

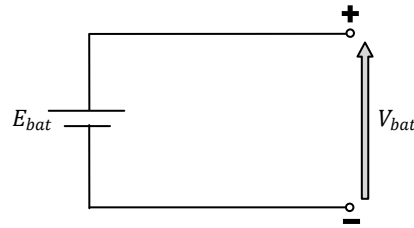


Figure II.17. Modèles électriques idéal de batteries.

Le modèle de Thévenin (figure II.18) est un modèle plus précis et considère la tension à vide E_{bat} , la résistance interne R_{bat} et la surtension (représenté par le condensateur C_{bat}). L'utilisation de ce modèle est adéquate pour des simulations à long terme [Kim_97]. Un schéma électrique d'un tel modèle est présenté dans la figure (II.18).

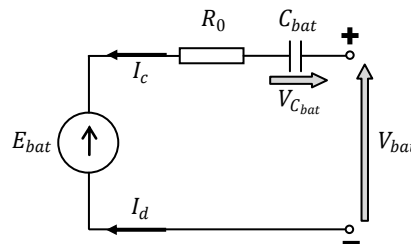


Figure II.18. Modèle électrique de Thévenin de la batterie.

Par convention, la batterie est vue comme un générateur. Le courant de charge est négatif et celui de décharge positif. Pour ce modèle, l'influence de la température est négligée. Il est obtenu en appliquant la loi des mailles :

$$V_{bat} = E_{bat} - R_0 I_{bat} + V_{C_{bat}} \quad (II.33)$$

où : $V_{C_{bat}}$ est la tension aux bornes du condensateur C_{bat} .

Les valeurs des éléments constituant le modèle sont déterminées par des essais de charge et de décharge dans le but d'approcher les courbes de fonctionnement de la batterie.

II.4.2. Hacheur réversible en courant

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus continu. Dans le cas du hacheur utilisé pour la charge/décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés [Jos_05] comme l'indique la figure (II.19).

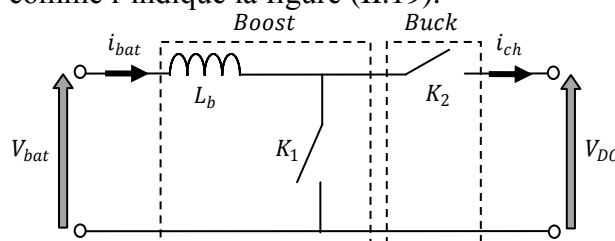


Figure II.19. hacheur réversible en courant

Sachant que la commande des interrupteur K_1 et K_2 est simultanée avec des rapports cycliques d_b et $1 - d_b$ complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par :

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L}(d_b V_{DC} - V_{bat}) \quad (II.34)$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus continu s'exprime :

$$i_{ch} = d_b i_{bat} \quad (II.35)$$

II.5. Bus continu

Le couplage des deux chaînes de conversion, photovoltaïque et éolienne, ainsi que les batteries de stockage, est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre la figure (II.20). Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.

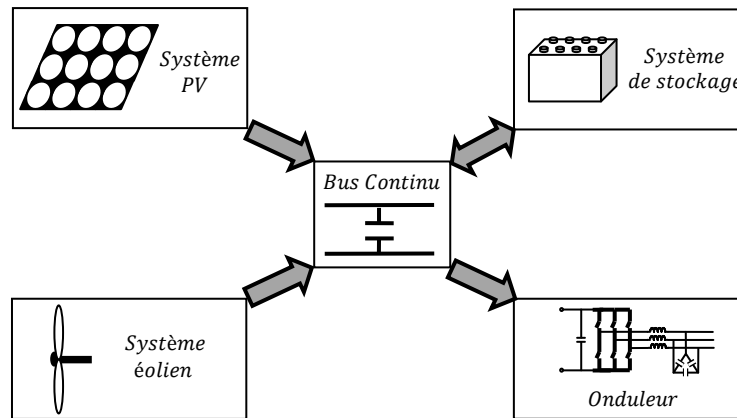


Figure II.20. Couplage des systèmes PV, éolien et batterie par le bus continu

Le bus continu est présenté en détail dans la figure (II.21). Il est représenté par un condensateur C_{bus} où sont connectés tous les bus continus des convertisseurs de l'électronique de puissance. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur.

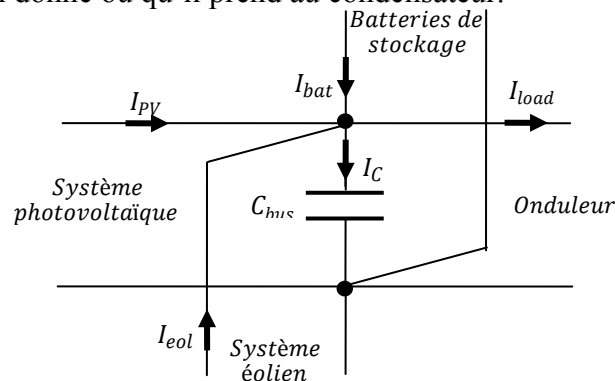


Figure II.21. Modèle du bus continu.

Les courants dans le bus continu agisse directement sur la valeur de la tension du bus V_{DC} . A partir de la figure II.18, on peut déduire l'équation suivante :

$$I_C = I_{PV} + I_{eol} + I_{bat} - I_{load} \quad (II.36)$$

La tension V_{DC} est une fonction du courant i_c :

$$I_C = C_{bus} \frac{d V_{DC}}{dt} \quad (II.37)$$

$$V_{DC} = V_{DC0}^{t_1} + \frac{1}{C_{bus}} \int_{t_1}^{t_2} I_C dt \quad (II.38)$$

La tension du bus continu V_{DC} doit être maintenue à une valeur de référence constante, à travers la commande du système de stockage. Les batteries stockent de l'énergie électrique lorsqu'elle est excédentaire, et en restituent dans le cas inverse.

II.6. Onduleur et filtre de sortie

La connexion entre le bus continu et la charge et/ou réseau électrique est réalisée à l'aide d'un onduleur de tension triphasé. Un filtre de sortie est nécessaire pour éliminer les harmoniques générés par l'onduleur à cause de la commutation. La tension de sortie doit répondre aux exigences des normes de standardisation (ANSI/IEEE standard 929-2000 et/ou UL-1741).

Le schéma électrique de notre circuit est donné dans la figure (II.22). Il s'agit d'un onduleur triphasé muni d'un filtre LC, pour filtrer ou lisser la puissance convertie.

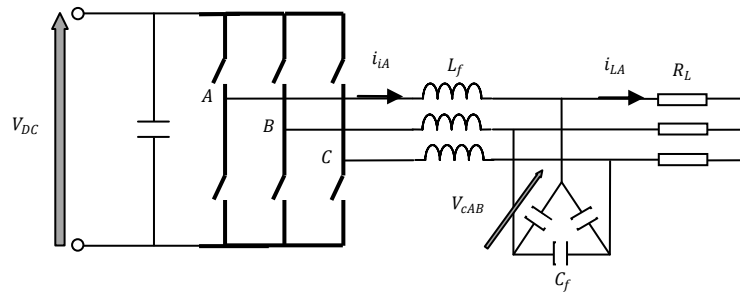


Figure II.22. Schéma électrique de l'onduleur triphasé

Dans ce qui va suivre, on va utiliser des notations vectorielles des tensions et courants du circuit présenté dans la figure (II.22)

Le vecteur $V_i = [V_{iAB} \ V_{iBC} \ V_{iCA}]^T$ représente les tensions entre phases de sortie de l'onduleur;

i_{iA}, i_{iB} et i_{iC} sont les courant de sortie de l'onduleur, en se basant sur ces courants, le vecteur des courants est défini comme $I_i = [i_{iAB} \ i_{iBC} \ i_{iCA}]^T = [i_{iA} - i_{iB} \ i_{iB} - i_{iC} \ i_{iC} - i_{iA}]^T$;

$V_c = [V_{cAB} \ V_{cBC} \ V_{cCA}]^T$ est le vecteur qui représente les tensions aux bornes des condensateurs du filtre;

Les courant qui passent dans la charge équilibrée sont représenté par $I_L = [i_{LA} \ i_{LB} \ i_{LC}]^T$.

En appliquant la loi des mailles et la loi des nœuds sur le filtre de sortie, et en utilisant la notation vectorielle définie précédemment. Les équations différentielles permettant de modéliser les tensions et les courants dans le filtre sont :

$$\begin{cases} \frac{dV_{cAB}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{iAB} - \frac{1}{3C_f} (i_{LA} - i_{LB}) \\ \frac{dV_{cBC}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{iBC} - \frac{1}{3C_f} (i_{LB} - i_{LC}) \\ \frac{dV_{cCA}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{iCA} - \frac{1}{3C_f} (i_{LC} - i_{LA}) \end{cases} \quad (II.39)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{iAB}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LAB} + \frac{1}{L_f} V_{iAB} \\ \frac{di_{iBC}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LBC} + \frac{1}{L_f} V_{iBC} \\ \frac{di_{iCA}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LCA} + \frac{1}{L_f} V_{iCA} \end{cases} \quad (II.40)$$

Les systèmes d'équation (II.39) et (II.40) peuvent être écrits sous forme vectorielle, comme suit:

$$\begin{cases} \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{3C_f} I_i - \frac{1}{3C_f} T I_L \\ \frac{dI_i}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_c + \frac{1}{L_f} V_i \end{cases} \quad (II.41)$$

Avec :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour passer du repère (A, B, C) au repère (d, q), on fait appel à la transformation de Clark. On l'applique sur le système d'équation (II.41), pour avoir :

$$\begin{cases} \frac{dV_{cdq}}{dt} = \frac{1}{3C_f} I_{idq} - \frac{1}{3C_f} T_{dq} I_{Ldq} \\ \frac{dI_{idq}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{cdq} + \frac{1}{L_f} V_{idq} \end{cases} \quad (II.42)$$

Avec :

$$V_{cdq} = [v_{cd} \ v_{cq}], \quad V_{idq} = [v_{id} \ v_{iq}], \quad I_{idq} = [i_{id} \ i_{iq}], \quad I_{Ldq} = [i_{Ld} \ i_{Lq}]$$

$$T_{dq} = K_s T K_s^{-1} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \end{bmatrix}$$

L'ensemble constitué pour l'onduleur triphasé et le filtre LC peut être modélisé donc par une équation d'état de la forme :

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + E d(t) \quad (\text{II. 43})$$

Tel que le choix du vecteur d'état et de commande est :

$$x = [V_{cd} \ V_{cq} \ i_{id} \ i_{iq}]^T, \quad u = [v_d \ v_q]^T, \quad d = [i_{Ld} \ i_{Lq}]^T$$

et

$$A = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & \frac{1}{3C_f} I_{2 \times 2} \\ -\frac{1}{L_f} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ \frac{1}{L_f} I_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3C_f} T_{dq} \\ 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

Les courants i_{Ld} et i_{Lq} qui passent dans la charge sont considérés comme étant des perturbations pour le système **[Jun_04]**.

En appliquant le théorème de la valeur moyenne, les interrupteurs de l'onduleur peuvent être remplacés par les rapports cycliques obtenus à la sortie de la commande de l'onduleur **[Vec_05]**.

Ainsi, en supposant que la tension du bus continu V_{dc} est fixe, les tensions de phase à l'entrée du filtre rapportées au point du neutre sont :

$$\begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

Où d_a, d_b et d_c sont les rapports cycliques des interrupteurs de l'onduleur.

II.7. Système de production d'eau chaude sanitaire

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et abondante qui peut nous aider à combler une bonne partie de nos besoins en énergie. Une bonne partie de cette énergie peut être donc utilisée pour produire de la chaleur. La production d'eau chaude sanitaire est parmi les applications de l'utilisation de cette énergie renouvelable.

Le système de production d'eau chaude sanitaire qu'on va étudier est représenté par la figure (II.23). Il est constitué d'un capteur solaire plat à circulation de liquide caloporteur. Ce capteur effectue la conversion de l'énergie du rayonnement émis par le soleil en énergie calorifique. Cette dernière est récupérée par le fluide caloporteur qui traverse le capteur à l'aide d'une pompe de circulation commandée par une régulation de température. Le rôle de cette pompe est de permettre un transfert plus rapide de chaleur captée par l'absorbeur vers le réservoir de stockage.

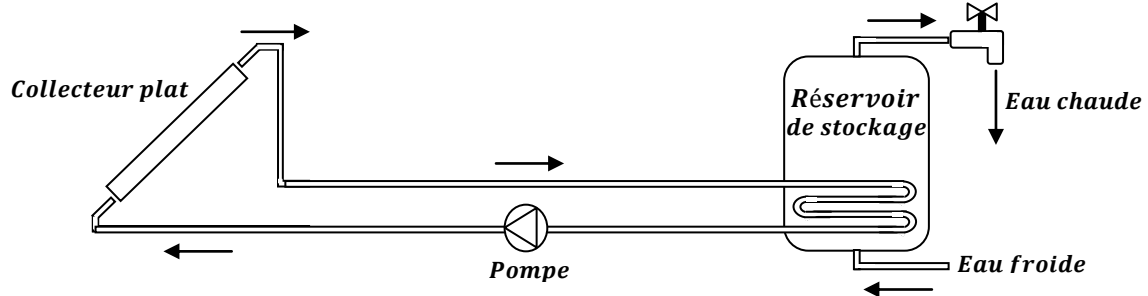


Figure II.23. Schéma d'un système de production d'eau chaude sanitaire

L'amélioration des performances énergétiques d'un tel système passe tout d'abord par la connaissance de son comportement dynamique. La modélisation est basée sur le calcul des bilans thermiques au niveau des éléments du système.

II.7.1. Collecteur plat

Considérant le collecteur plat dans la figure (II.24), le modèle décrit la dynamique de la température de fluide à la sortie du collecteur $T_{co}(t)$ en fonction des entrées variables et des paramètres du système.

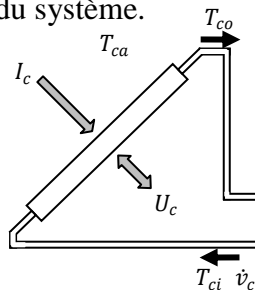


Figure II.24. Schéma d'un capteur thermique plat (collecteur plat)

Dans le cas du régime permanent du collecteur, la quantité de chaleur à l'entrée dans le collecteur égale à la quantité de chaleur de sortie. Donc, l'énergie thermique captée par le fluide caloporteur est égale à la différence entre l'énergie solaire thermique captée par le collecteur, et celle dissipée par ce dernier.

La température du fluide à la sortie du collecteur $T_{co}(t)$ est donnée par l'équation différentielle du premier ordre suivante [Buz_09]:

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{A_c \eta_0}{C_c} I_c(t) - \frac{U_c A_c}{C_c} \left(\frac{T_{ci}(t) + T_{co}(t)}{2} - T_{ca}(t) \right) + \frac{\dot{v}_c}{V_c} (T_{ci}(t) - T_{co}(t)) \quad (\text{II.45})$$

Avec :

A_c, η_0 et U_c sont respectivement la surface (m^2), l'efficacité optique et le coefficient de déperdition thermique ($Wm^{-2}K^{-1}$) du collecteur.

C_c, V_c et \dot{v}_c sont respectivement la capacité calorifique (JK^{-1}), le volume (m^3) et le débit volumétrique (m^3s^{-1}) du fluide caloporteur du collecteur.

T_{ci} et T_{ca} sont respectivement la température du fluide à l'entrée du collecteur et la température ambiante (K).

I_c est l'éclairement solaire que subit le collecteur (Wm^{-2}).

II.7.2. Réservoir de stockage avec échangeur de chaleur

La modélisation du réservoir de stockage d'eau chaude a fait l'objet de plusieurs travaux [Dan_08][Jil_08]. Le modèle mathématique décrit la température de l'eau chaude dans le réservoir en fonction du temps, sous forme d'équation différentielle. Dans notre cas, on va exploiter le modèle développé par [Buz_09], en supposant que la température d'eau est homogène à l'intérieure du réservoir.

Dans les petites installations des systèmes d'eau chaude sanitaire, telles que dans les applications domestiques, les réservoirs de stockage ne dépassent pas 500 l. Ils sont généralement équipés d'un échangeur de chaleur en bas du réservoir.

D'autres hypothèses doivent être prises en compte :

1. La température d'eau (froide) rentrante dans le réservoir est supposée constante c.à.d. $T_d(t) = T_d$.
2. Le modèle ne prend pas en compte les déperditions entre le réservoir et l'extérieur.

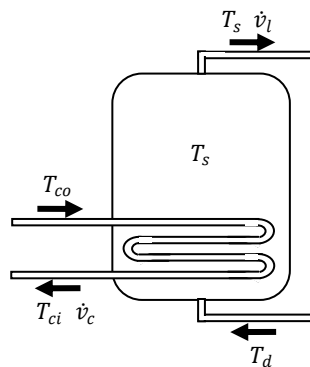


Figure II.25. Schéma d'un réservoir de stockage avec un échangeur de chaleur.

Le bilan énergétique sur le caloporteur au niveau du ballon est exprimé par l'équation suivante :

$$\frac{dT_s(t)}{dt} = \frac{\dot{v}_l(t)}{V_s} (T_d - T_s(t)) + \frac{\dot{v}_c}{V_c} (T_{co}(t) - T_{ci}(t)) \quad (II.46)$$

où :

V_s et \dot{v}_s sont respectivement le volume (m^3) et le débit volumétrique (m^3s^{-1}) de l'eau dans le réservoir de stockage.

T_s est la température, supposée uniforme, de l'eau (chaude) dans le réservoir(K).

La température du fluide caloporteur à la sortie de l'échangeur de chaleur peut être décrite par l'équation suivante [Buz_09]:

$$T_{ci}(t) = (T_{co}(t) - T_s(t))e^{-\frac{U_{ex}A_{ex}}{\dot{v}_c(t)\rho c}} + T_s(t) \quad (II.47)$$

Avec :

ρ et c sont la densité (m^3Kg^{-1}) et la chaleur spécifique ($JKg^{-1}K^{-1}$) du caloporteur dans l'échangeur de chaleur, respectivement.

U_{ex} et A_{ex} sont le coefficient de transfert de chaleur ($Wm^{-2}K^{-1}$) et la surface (m^2) de l'échangeur de chaleur, respectivement.

II.8. Modélisation thermique d'une chambre de la maison

Dans cette section, on développe un modèle thermique d'une pièce de notre maison, dont le but de commander sa température ambiante. Plusieurs méthodes de modélisation existent et traitées par [Hud_99][Men_03]. Lorenz et Masy (1982) [Lor_82] ont décrit un modèle simple basé sur l'analogie thermique-électrique, qui est devenu le plus utilisé depuis. Le modèle qu'on va utiliser ici est basé sur leurs travaux et sur [Hud_99].

Pour atteindre notre but de commande de la température de la pièce ; on doit modéliser aussi l'actionnaire. Dans notre cas, c'est un chauffage auxiliaire qui fait circuler l'eau chaude dans son circuit à l'aide d'une pompe commandée. On exploite le transfert de chaleur entre l'eau chaude et l'air ; par convection pour chauffer la pièce. Le rôle de la pompe est, comme celle du système de production d'eau chaude, est de permettre un transfert plus rapide de la chaleur du chauffage vers la pièce.

II.8.1. La chambre de la maison

La chambre qu'on va modéliser est représentée dans la figure (II.26). Elle se compose de : deux murs extérieurs, des murs intérieurs, le sol et le plafond. Des sources de chaleurs sont prises en compte dans ce modèle, il s'agit du flux de chaleur reçu du soleil par les murs extérieurs ; le gain d'énergie dû à la ventilation et aux équipements dans la pièce et un chauffage auxiliaire qui fait circuler l'eau chaude dans son circuit à l'aide d'une pompe commandée, afin de régler la température ambiante de la chambre.

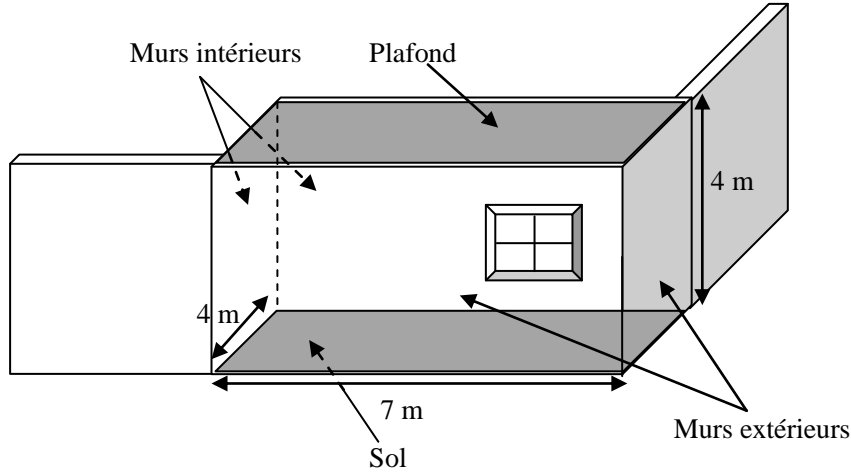


Figure II.26. Chambre à chauffer.

Dans ce qui va suivre, on va décrire chaque composant de la chambre par une équation thermique.

- Premier mur extérieur :

$$\frac{d T_{w_1}}{dt} = \frac{A_{w_1}}{C_{w_1}} [U_{i_{w_1}} (T_{ai} - T_{w_1}) + U_{o_{w_1}} (T_{ao} - T_{w_1})] \quad (II. 48)$$

- Deuxième mur extérieur :

$$\frac{d T_{w_2}}{dt} = \frac{A_{w_2}}{C_{w_2}} [U_{i_{w_2}} (T_{ai} - T_{w_2}) + U_{o_{w_2}} (T_{ao} - T_{w_2})] \quad (II. 49)$$

- Le sol :

$$\frac{d T_f}{dt} = \frac{A_f}{C_f} \left[\frac{p Q_f}{A_f} + U_f (T_{ai} - T_f) \right] \quad (II. 50)$$

- Le plafond :

$$\frac{d T_c}{dt} = \frac{A_c}{C_c} [U_c (T_{ai} - T_c)] \quad (II. 51)$$

- Les murs intérieurs :

$$\frac{d T_{ip}}{dt} = \frac{A_{ip}}{C_{ip}} \left[\frac{(1-p) Q_s}{A_{ip}} + U_{ip} (T_{ai} - T_{ip}) \right] \quad (II. 52)$$

- L'air :

$$\begin{aligned} \frac{d T_{ai}}{dt} = \frac{1}{C_a} & \left[Q_p + Q_e + (A_g U_g + U_V) (T_{ao} - T_{ai}) + A_{w_1} U_{i_{w_1}} (T_{w_1} - T_{ai}) \right. \\ & + A_{w_2} U_{i_{w_2}} (T_{w_2} - T_{ai}) + A_f U_f (T_f - T_{ai}) + A_c U_c (T_c - T_{ai}) \\ & \left. + A_{ip} U_{ip} (T_{ip} - T_{ai}) \right] \quad (II. 53) \end{aligned}$$

La nomenclature et les indices sont les suivants :

Nomenclature :

T : température (K)

C : capacité calorifique (JK^{-1})

Q : flux de chaleur (W)

A : surface (m)

P : tau d'irradiation solaire passé par les murs

U : coefficient de transmission thermique ($Wm^{-2}K^{-1}$)

U_V : coefficient de déperditions due au ventilation (WK^{-1})

Indices :

w_1 : mur extérieur 1

w_2 : mur extérieur 2

f : sol

c : plafond

ip : murs intérieurs

ai : air interne

ao : air externe

s : solaire

g : vitrage

e : chauffage interne

p : équipements

Ce qui nous donne le modèle illustré dans la figure (II.27).

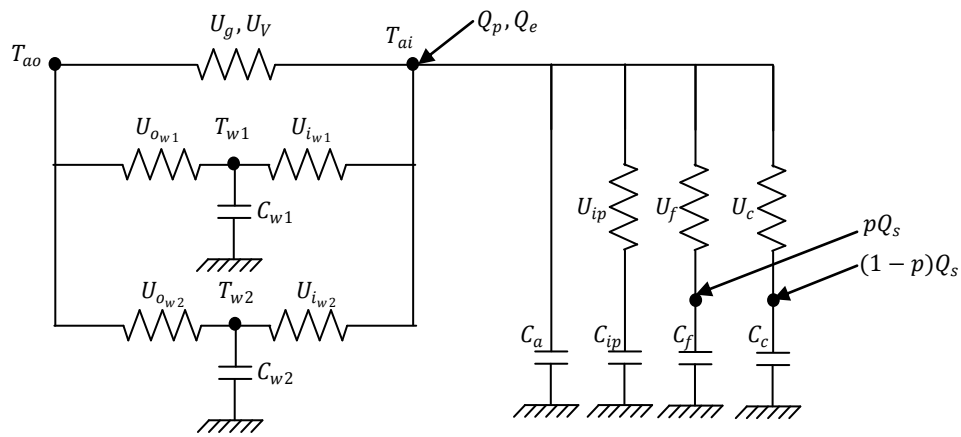


Figure II.27. Modèle électrique de la chambre [Hud_99].

Les équations de (1) à (6) peuvent être regroupées pour former un système d'état de la forme :

$$\dot{T} = A_T T + B_T Q_i \quad (II.54)$$

Avec un vecteur d'état $T = [T_{w_1} \ T_{w_2} \ T_f \ T_c \ T_{ip} \ T_{ai}]^T$, et un vecteur de commande $Q_i = [Q_p \ Q_e \ Q_s \ T_{ao}]^T$.

Les équations d'état de la chambre sont données dans l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} T_{w1} \\ T_{w2} \\ T_f \\ T_c \\ T_{ip} \\ T_{ai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{w1}[U_{iw1}+U_{ow1}]}{C_{w1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_{w1}U_{iw1}}{C_{w1}} \\ 0 & -\frac{A_{w2}[U_{iw2}+U_{ow2}]}{C_{w2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{A_{w2}U_{iw2}}{C_{w2}} \\ 0 & 0 & -\frac{A_f U_f}{C_f} & 0 & 0 & \frac{A_f U_f}{C_f} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{A_c U_c}{C_c} & 0 & \frac{A_c U_c}{C_c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{A_{ip} U_{ip}}{C_{ip}} & \frac{A_{ip} U_{ip}}{C_{ip}} \\ \frac{A_{w1}U_{iw1}}{C_a} & \frac{A_{w2}U_{iw2}}{C_a} & \frac{A_f U_f}{C_a} & \frac{A_c U_c}{C_a} & \frac{A_{ip} U_{ip}}{C_a} & -\frac{A_g U_g + U_V + A_{w1}U_{iw1} + A_{w2}U_{iw2} + A_f U_f + A_c U_c + A_{ip} U_{ip}}{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{w1} \\ T_{w2} \\ T_f \\ T_c \\ T_{ip} \\ T_{ai} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{A_{w1}U_{ow1}}{C_{w1}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{A_{w1}U_{ow1}}{C_{w1}} \\ 0 & 0 & \frac{p}{C_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-p)}{C_{ip}} & 0 \\ \frac{1}{C_a} & \frac{1}{C_a} & 0 & \frac{A_g U_g + U_V}{C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_p \\ Q_e \\ Q_s \\ T_{ao} \end{bmatrix} \quad (II.55)$$

II.8.1. Le chauffage auxiliaire

Le chauffage auxiliaire est modélisé pour évaluer le taux du flux de chaleur émis $Q_{A_{loss}}$, qui est inférieur au égal à $Q_{A_{max}}$. L'émission du flux de chaleur est assurée par la circulation d'eau chaude dans le circuit du chauffage. Cette circulation est commandée par une pompe située entre le réservoir de stockage d'eau chaude et le chauffage. Si la température de la pièce est inférieure à la température désirée, on actionne la pompe pour la chauffer, et vice-versa.

- Dans le cas où il n'y a pas de circulation d'eau dans le chauffage $\dot{m}_A = 0$, ou bien la pompe n'est pas actionnée, on a [TRN_04]:

$$T_{Afo} = T_{Afi}, \quad Q_{A_{loss}} = 0, \quad Q_{A_{fluid}} = 0, \quad Q_A = 0 \quad \text{tel que : } Q_A = Q_{A_{loss}} + Q_{A_{fluid}}$$

Avec :

T_{Afo} et T_{Afi} sont les température (K) du fluide à la sortie et à l'entrée de l'échangeur, respectivement.

Q_A et $Q_{A_{loss}}$ sont les flux de chaleur total et perdue (émis) par le chauffage (W), respectivement. Tandis que $Q_{A_{fluid}}$ est le flux de chaleur du fluide circulant dans le chauffage.

- Dans le cas où la pompe est actionnée, l'eau chaude circule dans le chauffage avec un débit massique $\dot{m}_A \neq 0$, l'équation qui exprime le flux de chaleur émis est :

$$Q_{A_{loss}} = U_A (\bar{T} - T_{ai}) + (1 - \eta_{htr})Q_{max} \quad (II.56)$$

et

$$Q_{Afluid} = \dot{m}_A C_{fluid} (T_{Afo} - T_{Afi}) \quad (II.57)$$

Avec:

$$\bar{T} = \frac{T_{Afo} + T_{Afi}}{2} \quad (II.58)$$

$$T_{Afo} = \frac{Q_{Amax} \eta_{htr} + \dot{m}_A C_{fluid} T_{Afi} + U_A T_{ai} - \frac{U_A T_{ai}}{2}}{\dot{m}_A C_{fluid} + \frac{U_A}{2}} \quad (II.59)$$

t.q : η_{htr} et U_A sont l'efficacité et le coefficient de départition thermique du chauffage auxilliaire.

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, les modèles mathématiques des différents composants de la maison à énergie positive sont présentés. On a commencé par la description des deux chaines de conversion, photovoltaïque et éolienne. Puis, on est passé au modèle de système de stockage. Et puisque ces systèmes sont couplés par l'intermédiaire d'un bus continu, un modèle de ce dernier a été décrit. L'étude de l'interfaçage entre le bus continu et la charge et/ou le réseau est faite en modélisant l'onduleur et le filtre de sortie.

La modélisation du système de production d'eau chaude sanitaire a été réalisée en effectuant un bilan énergétique thermique de chaque élément du système. L'eau chaude produite est supposée exploitée en la faisant passer dans un chauffage auxiliaire, pour chauffer une pièce de la maison. Cette dernière à été modélisée en se basant sur l'analogie électrique thermique.

Les modèles des sous systèmes de production élaborés dans ce chapitre seront utilisés pour commander et optimiser l'énergie qu'ils produisent. Dans le chapitre suivant, on va étudier la commande permettant le control de tous les sous systèmes de la maison, ainsi que l'optimisation de leurs énergies produites.

Chapitre III :

Commande Hybride et Optimisation de la Maison à Energie Positive

III.1. Introduction

Pour réaliser une maison dont le bilan est positif, il ne suffit pas seulement de produire de l'énergie, mais il faut l'optimiser aussi. Pour qu'un générateur photovoltaïque ou éolien délivre sa puissance maximale, il est nécessaire d'élaborer une commande MPPT. La tension de bus continu doit être stabilisée à travers la commande appliquée sur le convertisseur intercalé entre les batteries et le bus continu. Aussi, la température d'eau chaude sanitaire produite par l'énergie solaire thermique peut être régulée à une température désirée ainsi que la température ambiante. L'optimisation et la commande de la maison à énergie positive dans ce travail sont assurées par une commande hybride.

Dans ce chapitre, nous allons aborder les développements théoriques des différentes techniques de commande qui seront utilisées pour synthétiser les régulateurs de la commande hybride. Nous commencerons par l'application de la commande floue dans les différents sous-systèmes, puis nous allons illustrer comment utiliser un seul régulateur flou pour la commande de tous ces sous-systèmes. Trois surfaces de glissements différentes sont détaillées pour l'utilisation dans la commande de l'onduleur par mode de glissement.

III.2. Commande hybride

Généralement, les systèmes sont classés en 2 catégories : les systèmes à temps continu et les systèmes à temps discret. Cependant, certains systèmes échappent à cette classification. Mêlant à la fois le temps continu et le temps discret, ce sont des systèmes hybrides [Sha_04]. En présence des composants de commutation électrique, les circuits de l'électronique de puissance sont considérés comme des systèmes hybrides [Rac_09].

Plusieurs concepts de la commande hybride existent dans la littérature. Le concept le plus répandu est celui qui prend des valeurs continues et discrètes pour la commande d'un système [Ant_97][Ant_98][Bra_98]. D'autres, décrivent la commande hybride comme une commande multi-niveaux hiérarchiques avec un contrôleur superviseur, c'est le cas de la commande appliquée sur un système multi-énergies dans [Fog_09][Kha_08] [Kha&Ira_08].

Si le système est hybride dans le sens de sa constitution de plusieurs sous-systèmes, pour concevoir un contrôleur par retour d'état, la méthode traditionnelle est de concevoir différents contrôleurs par retour d'état pour les différents sous-systèmes. La commande conçue est considérée comme une commande hybride [Zhe_10].

Dans notre cas, le contrôleur hybride est constitué de deux contrôleurs principaux. Le premier est un contrôleur uniforme [Zhe_10] de type flou, il est utilisé pour : l'optimisation des chaînes de conversions photovoltaïques et éolienne, la stabilisation de la tension de bus continu, la commande de la température de l'eau et la température ambiante de la chambre. Le deuxième contrôleur est à base de la

commande par mode de glissement pour la commande de la tension de sortie de l'onduleur.

III.3. Commande et optimisation à base de logique floue

III.3.1. La logique floue

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs Américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous-ensemble flou (*fuzzy* en Anglais) soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation des phénomènes sous forme floue [Bor_98].

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel [Bor_98]. Grâce au chercheur Japonais M. Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985, les sociétés Japonaises commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande [Buk_94].

III.3.1.1. Terminologie de la logique floue

a) Variable linguistique

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues (quelque, souvent, chaud, froid, rapide, lent...). Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance [Buh_94].

b) Fonctions d'appartenances

Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Si l'ensemble de référence est un ensemble fini, les valeurs d'appartenance sont des valeurs discrètes définies dans $[0, 1]$. Si l'ensemble est infini, on peut représenter ces valeurs comme des fonctions d'appartenance continues. La fonction d'appartenance est notée par $\mu_A(x)$, l'argument x se rattache à la variable linguistique et l'indice A désigne l'ensemble concerné [God_99]. Elle peut être monotone, triangulaire, trapézoïdale, ou en forme de cloche comme le montre la figure (III.1).

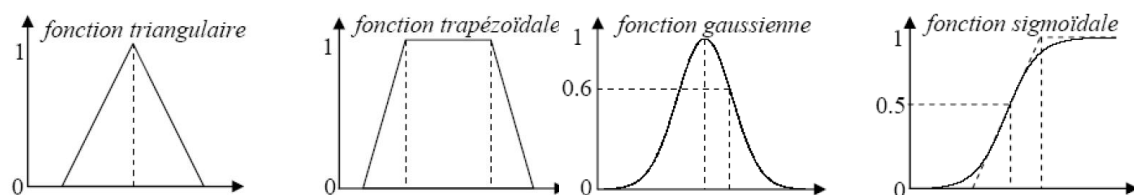


Figure III.1. Fonctions d'appartenances.

c) Univers de discours et classes d'appartenances

Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de références ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'ensemble des prédicats peut être caractérisé par un ensemble de sous-ensembles flous. Chaque sous ensemble flou dans l'univers de discours représente une valeur linguistique [29].

d) Opérateurs de la logique floue

Comme pour les ensembles classiques, on peut définir différentes opérations sur les ensembles flous. Soient A et B deux ensembles flous dans l'univers U .

Pour $x \in U$ on a :

- **Complémentation** : $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
- **Intersection** : $\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x))$
- **Union** : $\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x))$

III.3.1.2. Structure de base d'un contrôleur flou

La structure conventionnelle d'un contrôleur flou est représentée par la figure (III.2). Elle est composée de quatre blocs.

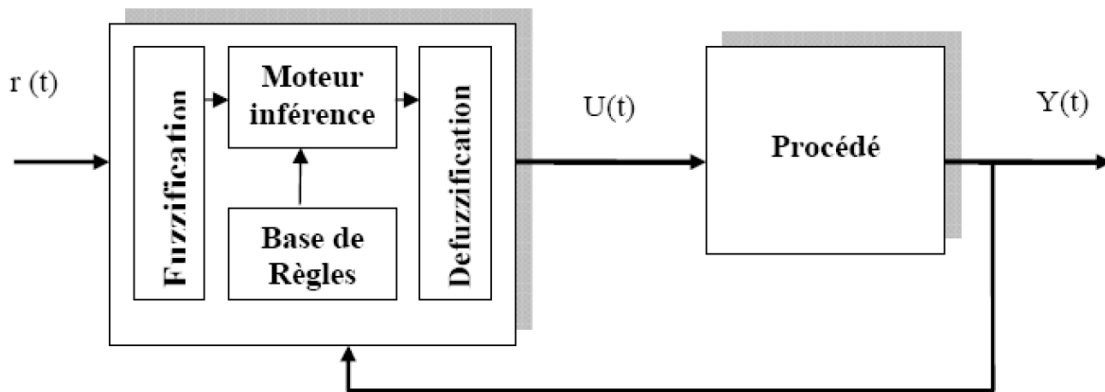


Figure III.2. Structure d'un contrôleur flou [Pas_98].

a) Fuzzification

La fuzzification consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps t , sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous-ensemble flou [Bor_98].

b) Les règles floues

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue est d'exprimer la connaissance humaine sous forme de règles linguistiques de forme Si...alors...Chaque règle à deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...
- Partie conséquence (conclusion), exprimée par Alors...

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquence exprime l'action que doit exécuter l'opérateur pour le contrôle de système [God_99].

Deux types de règles flous existent :

- **Les règles de Mamdani :** où la forme typique des règles s'écrit :

Si (x_1 est E_1) et (x_2 est E_2) et...et (x_n est E_n) **Alors** (u_1 est C_1) et (u_2 est C_2) et...et (u_m est C_m)

où : $x_1 \dots x_n$ sont les variables d'entrées, $u_1 \dots u_m$ sont les variables de sortie, $E_1 \dots E_n$ et $C_1 \dots C_m$ sont les sous-ensembles flous.

- **Les règles de Takagi Sugeno :** Elles sont similaires à celles de Mamdani, elles diffèrent dans la deuxième partie (conséquence). La forme typique de ces règles s'écrit :

Si (x_1 est E_1) et (x_2 est E_2) et...et (x_n est E_n) **Alors** $u_1 = f_1(x_1 \dots x_n)$, $u_2 = f_2(x_1 \dots x_n) \dots u_m = f_m(x_1 \dots x_n)$.

Les fonctions f_1, f_2, \dots, f_m sont des fonctions réelles, elles peuvent être linéaires ou non linéaires.

c) Inférences

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connexions (et) et (ou) [God_99]. Cette partie décisionnelle où le contrôleur décide l'action similaire à celle d'un opérateur humain. Elle présente et englobe toutes les connaissances de l'expert humain sur la dynamique ainsi que les caractéristiques du système.

Soit un régulateur flou dont les entrées sont l'erreur e et sa dérivée Δe , avec une sortie de commande u . On peut avoir une description d'une base de règles possible comme suit :

Δu		e		
		N	Z	P
Δe	N	P	P	Z
	Z	Z	Z	Z
	P	Z	N	GN

Tableau III.1. Exemple d'une table d'inférence.

Avec : N : Négatif, Z : Zéro et P : positif.

d) Defuzzification

La defuzzification permet de passer d'un degré d'appartenance d'une commande à la détermination de la valeur à donner à cette commande. Il existe plusieurs méthodes de defuzzification, dont la plus utilisée est celle du centre de gravité [Bor_98].

Ces méthodes sont :

- **Méthode du maximum** : Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence.
- **Méthode de la moyenne des maxima** : Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.
- **Méthode du centroïde** : Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous, elle génère le centre de gravité de la fonction d'appartenance issue de l'inférence.

$$y = \frac{\int y \mu_y(y) dy}{\int \mu_y(y) dy} \quad (\text{III. 1})$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface.

- **Méthode de la somme pondérée** : Il s'agit d'un compromis entre les deux méthodes précédentes.

III.3.2. Le contrôleur flou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale

III.3.2.1. Poursuite du point de puissance maximale

La Poursuite du point de puissance maximale, ou le MPPT (Maximum Power Point Tracking), est un mécanisme de contrôle et de poursuite qui est utilisé dans les systèmes photovoltaïques et éoliens pour maximiser la puissance délivrée par le générateur, en poursuivant continuellement le point de puissance maximale. Sachant que la caractéristique de générateur photovoltaïque dépend de l'ensoleillement et de la température, et que celle de l'éolien dépend de la vitesse du vent. Le point de puissance maximum n'est pas évident à atteindre. La figure (III.3) montre une vue générale d'un système qui peut être photovoltaïque ou éolien doté d'un contrôleur MPPT.

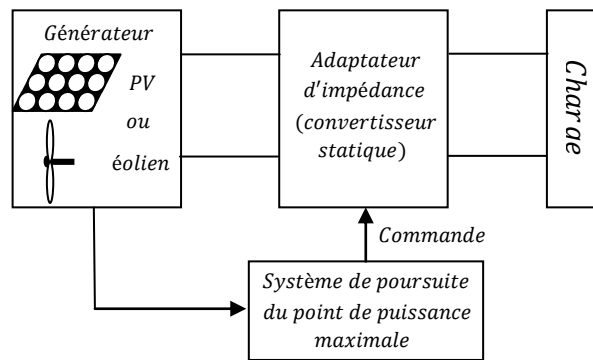


Figure III.3. Vue Générale d'un système photovoltaïque ou éolien doté d'un MPPT.

L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique pour effectuer le transfert optimal d'énergie. La commande de ce convertisseur permettra de faire fonctionner le système en un point où le générateur délivre le maximum de puissance.

III.3.2.2. MPPT appliqué sur les systèmes photovoltaïques

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et de leurs faible rendement (entre 12% et 17%), des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit la charge [Boe_68].

Comme nous pouvons le constater sur la figure (III.4), la caractéristique du générateur PV, ainsi que le PMM, dépend des variations de l'éclairement et la température. On remarque que la puissance maximale est proportionnelle à l'ensoleillement, contrairement à la température.

On constate aussi de la figure (III.5) que le fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé. D'où la nécessité d'une commande MPPT.

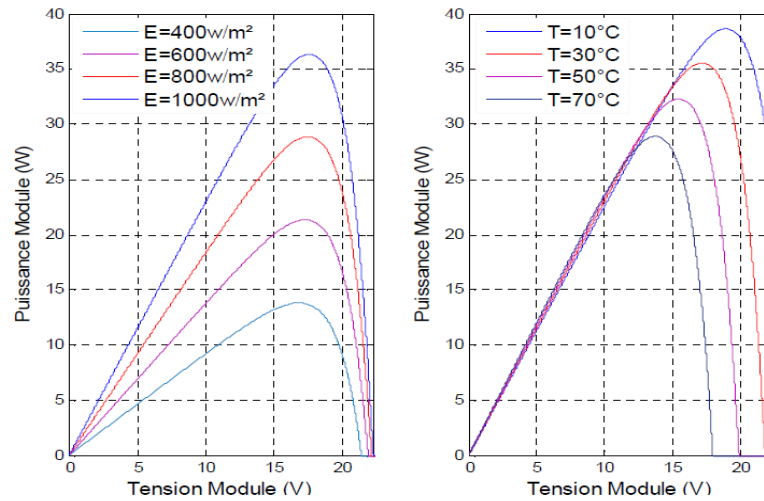


Figure III.4. Exemple de caractéristiques puissance/tension d'un générateur photovoltaïque, à gauche pour différents éclairagements, à droite pour différentes températures de jonction

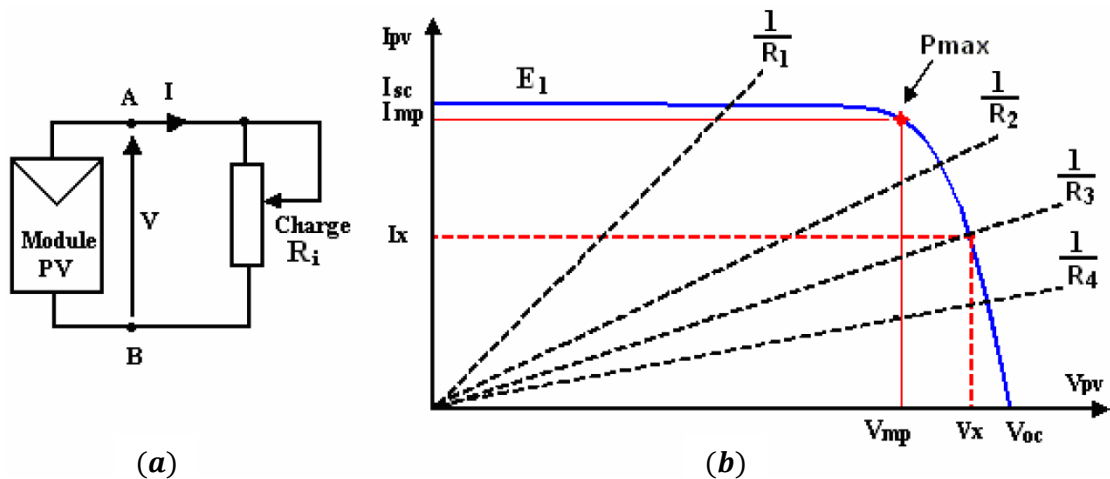


Figure III.5. (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge. (b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous un niveau d'éclairage E_1 avec une charge résistive variable (R_1, R_2, R_3, R_4)

Plusieurs publications sur des méthodes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature. On peut les classer en [Esr_06]:

- **Méthodes à contre réaction de tension :** Cette méthode se base sur l'asservissement de la tension du générateur à une tension de référence. La tension de référence peut être fixe, en fonction de V_{oc} ou externe (cellule pilote).
- **Méthodes à contre réaction de courant :** Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension, le courant de court circuit du générateur permet de savoir la valeur du courant optimal qui correspond au fonctionnement à puissance maximale du générateur. Le courant optimal est proportionnel au courant de court circuit ($I_{MPP} = K I_{sc}$). Le coefficient K est généralement entre 0.78 et 0.92 [Esr_06].
- **Méthodes à contre réaction de puissance :** Ces méthodes se basent sur des algorithmes, de recherche itérative, qui permettent de trouver le point de

fonctionnement maximal du générateur sans interruption du système. La puissance extraite du générateur est calculée à partir des mesures du courant et de la tension, la multiplication de ces deux grandeurs donne la puissance. Le sens de variation de la puissance est connu par le calcul approximatif de la dérivée $dP = P(k) - P(k - 1)$ sur un temps d'échantillonnage.

- **Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT** : elles se basent sur les techniques intelligentes nouvellement introduites dans le monde de contrôle des MPPT. IL s'agit des réseaux de neurones et de la logique floue.

III.3.2.3. MPPT appliqué sur les systèmes éoliens

La courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique « au gré du vent » : on parle ainsi de maximisation de la puissance, donc de MPPT. La nécessité de ce type d'optimisation énergétique est d'autant plus significative pour les applications de petites puissances telles que dans le cadre de l'intégration à l'habitat. On doit alors souvent faire face à des gisements fortement instationnaires en raison de la rugosité des sites (cas de sites urbains). La présence de ces turbulences nécessite d'autant plus un réglage performant de la charge de l'éolienne.

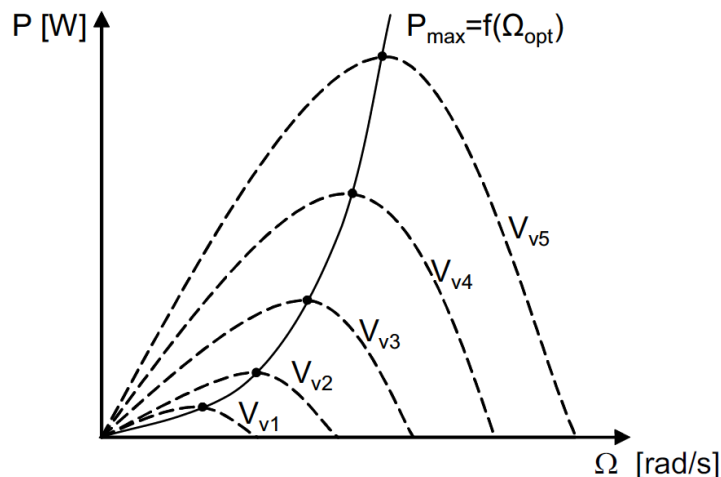


Figure III.6. Caractéristique Puissance-vitesse de rotation d'une éolienne

Comme on a vu précédemment dans le paragraphe I.4.1.2.c, la vitesse variable joue un rôle très important dans l'optimisation de la puissance éolienne. On voit depuis la figure (III.6), que pour chaque vitesse du vent, le point de puissance maximale correspond à une vitesse de rotation optimale de la génératrice. La plupart des techniques MPPT appliquées sur les systèmes éoliens se base sur la commande de la vitesse de rotation de générateur éolien pour extraire le maximum d'énergie.

La commande de la vitesse de rotation du générateur éolien, afin d'atteindre le MPP, peut être réalisée d'une manière directe ou indirecte. La première approche demande un convertisseur actif, redresseur MLI à six interrupteurs par exemple, et un capteur mécanique (vitesse de rotation et position).

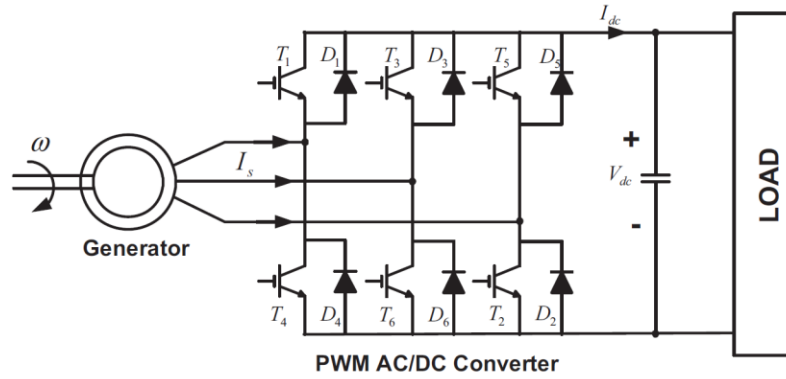


Figure III.7. Schéma de principe de commande MPPT pour une architecture de chaîne de conversion éolienne à base d'un redresseur MLI

Un contrôle indirect de la vitesse de rotation, donc de la puissance éolienne, est possible par l'utilisation d'une chaîne de conversion plus simple et moins coûteuse. Elle est constituée à base de pont de diodes triphasés et d'un hacheur classique en aval. La commande du hacheur permet de contrôler le courant de charge. Contrairement au cas précédent ; le contrôle de la charge mécanique de la turbine ou bien de sa vitesse s'effectue de façon indirecte à travers le pont de diodes.

Quelques méthodes MPPT exigent la connaissance de la caractéristique $C_p(\lambda)$ (figure III.8), pour savoir la vitesse de référence Ω_{opt} pour laquelle on atteint le MPP. Cela se fait en substituant l'équation (II.14) dans (II.13), et on obtient l'équation suivante :

$$P(\Omega) = \frac{C_p(\Omega_T) A \rho}{\lambda^3} \Omega^3 \quad (III. 2)$$

Sur le point de puissance maximale P_{MPP} , on a :

$$\Omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{P_{MPP}}{K_{opt}}} \quad (III. 3)$$

Avec K_{MPP} est un coefficient fixe donné par l'équation suivante :

$$K_{opt} = \frac{C_{p_{opt}} A}{\lambda_{opt}} \quad (III. 4)$$

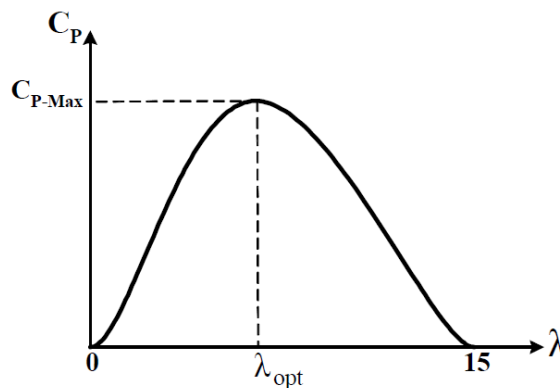


Figure III.8. caractéristique de coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse normalisée λ

A partir de ces équations, il est possible de converger vers le point de fonctionnement maximisant la puissance et ce à l'aide d'une simple mesure de puissance. L'algorithme de la convergence est le suivant:

1. en mesurant la puissance P_1 à la vitesse de rotation Ω_1 , la vitesse de référence est calculée selon l'équation (III.3) ce qui équivaut à trouver une vitesse $\Omega_{ref} = \Omega_2$ correspondante au point (Ω_2, P_1) de la courbe optimale $P_{opt} = f(\Omega_{opt})$.
2. après une période de calcul, l'état de système équivalent à (Ω_2, P_2) est atteint et la vitesse de référence Ω_3 est calculée
3. après plusieurs itérations, selon la valeur de l'inertie et de la bande passante du régulateur de vitesse, le point optimal (Ω_{opt}, P_{MPP}) est atteint **[mrk]**.

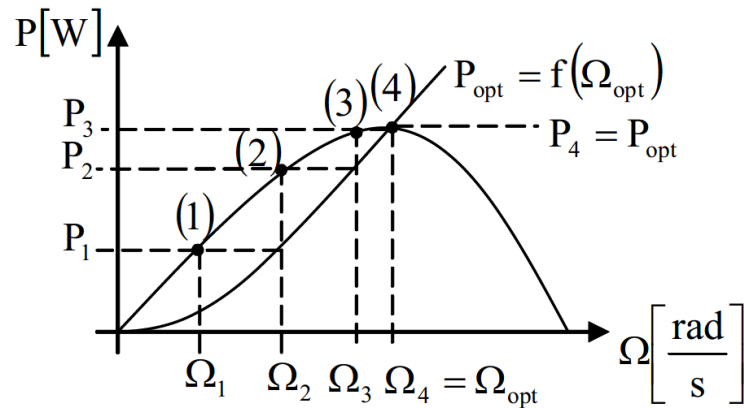


Figure III.9. Convergence vers le MPP par contrôle en vitesse **[Mir_05]**.

En appliquant les méthodes intelligentes de l'automatique comme la logique floue, on peut atteindre le MPP sans connaître la caractéristique $C_p(\lambda)$ et sans utilisation des capteurs de vitesses (vent ou génératrice) avec une structure moins coûteuse basée simplement sur un pont de diodes triphasées.

III.3.2.4. Principe de poursuite du point de puissance maximale par un contrôleur flou

a) MPPT flou appliqué sur le système photovoltaïque

L'objectif de la commande est d'extraire et de poursuivre la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque pour différentes insolation et différentes valeurs de température. La puissance maximale qui correspond au point de fonctionnement optimal est déterminée pour différentes insolation des rayons solaires ainsi que pour différentes variations de température.

Dans un but de poursuivre le PPM ; on va commander le convertisseur DC/DC de type Buck-Boost par un contrôleur flou. Le hacheur est intercalé entre la source d'entrée (le générateur PV) et la charge, comme dans la figure (III.10).

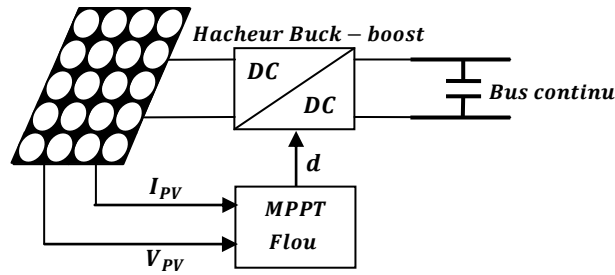


Figure III.10. Schéma (synoptique) du système photovoltaïque avec MPPT flou.

Comme indiqué précédemment, le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants : Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire ensuite l'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification centroïde. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure (III.11). (G_E , $G_{\Delta E}$ et G_s sont les gains d'entrées et sortie)

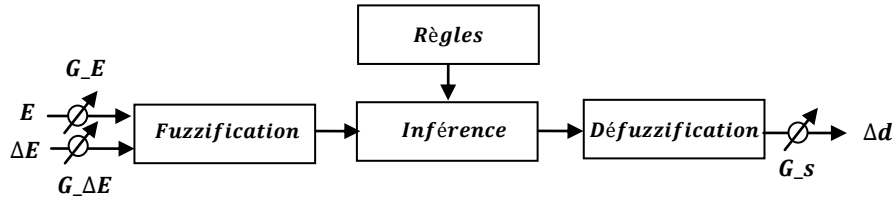


Figure III.11. Structure de base du contrôleur flou

- **Fuzzification**

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément. La puissance peut être calculée ainsi:

$$P_{PV}(k) = I_{PV}(k) \cdot V_{PV}(k) \quad (III.5)$$

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relatifs ; à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont : l'erreur (E_{PV}) et le changement de l'erreur (ΔE_{PV}) à des instants échantillonnés (k) exprimés comme suit :

$$E_{PV}(k) = \frac{P_{PV}(k) - P_{PV}(k-1)}{V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1)} \quad (III.6)$$

$$\Delta E_{PV}(k) = E_{PV}(k) - E_{PV}(k-1) \quad (III.7)$$

Où $P_{PV}(k)$, $I_{PV}(k)$ et $V_{PV}(k)$ sont respectivement: la puissance, le courant et la tension du générateur photovoltaïque.

D'après l'entrée $E_{PV}(k)$ on peut savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe puissance-tension.

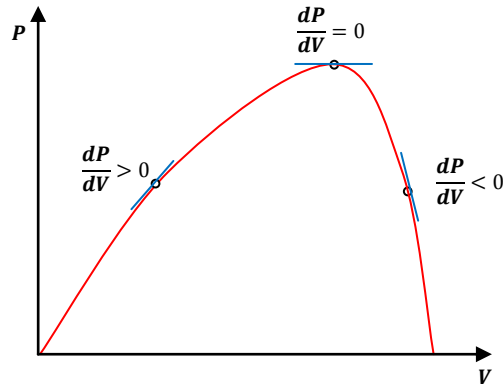


Figure III.12. Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement.

- Si $E_{PV}(k)$ est positif, le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale
- Si $E_{PV}(k)$ est négatif, le point de fonctionnement est à droite du point de puissance maximale
- $E_{PV}(k)$ est Zéro, le point de fonctionnement est au point de puissance maximale.

D'après l'entrée $\Delta E_{PV}(k)$ on peut déterminer la valeur de la variation de l'erreur de l'entrée du contrôleur flou qui représente la direction du point de fonctionnement.

Dans ce cas, pour atteindre le point de puissance maximale on doit :

- Pour pousser vers la droite le point de fonctionnement qui se situe à gauche du point de puissance maximale, il faut augmenter la tension.
- Pour pousser vers la gauche le point de fonctionnement qui se situe à droite du point de puissance maximale, il faut diminuer la tension.

Sachant que, l'augmentation du rapport cyclique d_{PV} provoque l'augmentation de la tension et vice versa.

En utilisant les bases des sous ensembles flou on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en terme de variable linguistiques ; ces dernières sont écrites en étiquettes comme suit:

PG : Positif Grand, *PP* : Positif Petit, *Z* : Zero, *NP* : Négatif Petit, *NG* : Négatif Grand.

La figure (III.14) montre les fonctions d'appartenances des 5 sous ensembles flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie. Chaque variable est limitée par une valeur minimale L_{min} , et une autre maximale L_{max} qui lui correspond.

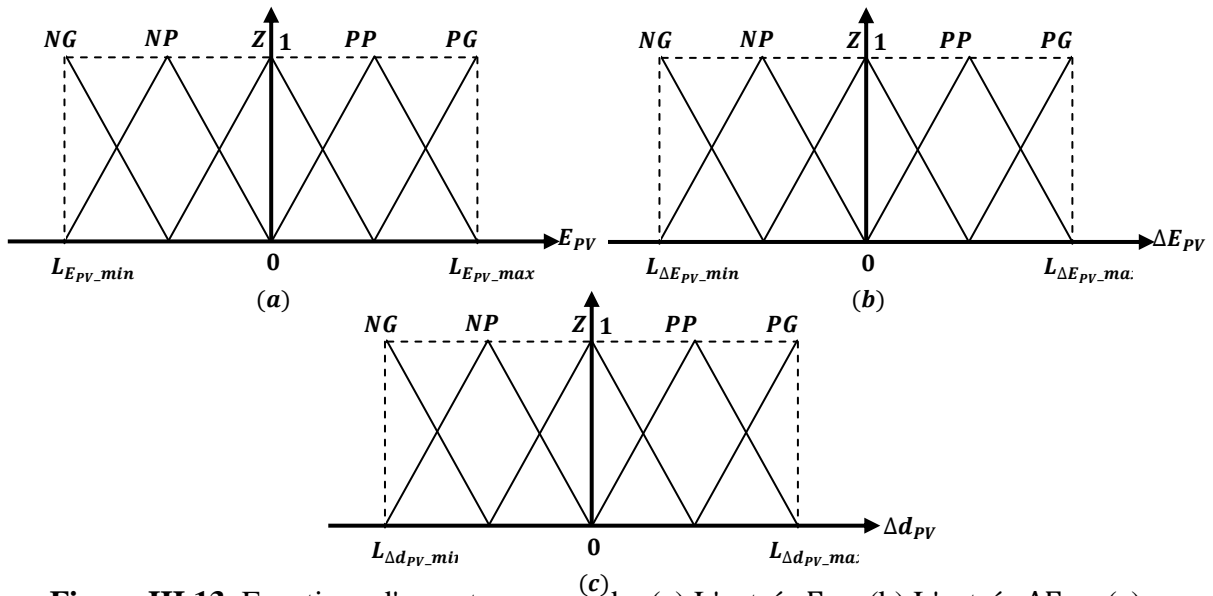


Figure III.13. Fonctions d'appartenance de: (a) L'entrée E_{PV} (b) L'entrée ΔE_{PV} (c) La sortie Δd_{PV} .

- **L'inférence**

La table (III.2) respresente la matrice d'inférence du controleur ou les entrées sont : l'erreur E_{PV} et la variation de l'erreur ΔE_{PV} . La sortie est Δd_{PV} .

Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E_{PV} doit être toujours Zéro.

Δd_{PV}		ΔE_{PV}				
		<i>NG</i>	<i>NP</i>	<i>Z</i>	<i>PP</i>	<i>PG</i>
E_{PV}	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>NP</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
	<i>Z</i>	<i>PP</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>NP</i>
	<i>PP</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PP</i>	<i>PP</i>	<i>PP</i>
	<i>PG</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>

Tableau III.2. Table d'inférence du MPPT flou.

La méthode de Mamdani a été utilisée comme méthode d'inférence floue. Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU.

- **Defuzzification**

La méthode la plus souvent utilisée est la méthode centroïde. C'est elle qu'on va utiliser dans notre travail, et qui donne le centre de gravité de la surface de la fonction membre globale.

Les valeurs de sorties sont défuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de control.

b) MPPT flou appliqué sur le système éolien

La génératrice synchrone à aimant permanent est connectée à un hacheur d'élevateur-abaisseur à travers un pont triphasé de diodes. C'est l'architecture proposée dans le paragraphe (II.3.1.). La puissance éolienne est maximisée par la commande MPPT flou appliquée sur le hacheur.

La méthode MPPT flou utilisée dans ce travail est basée sur les travaux de (Qingrong Zeng et al, 2008) [Qin_08]. C'est une méthode qui ne nécessite aucun capteur mécanique, ni de vitesse de rotation, ni de vitesse de vent. Des mesures de la puissance et de la tension continue à la sortie de pont de diodes suffisent pour poursuivre le MPP.

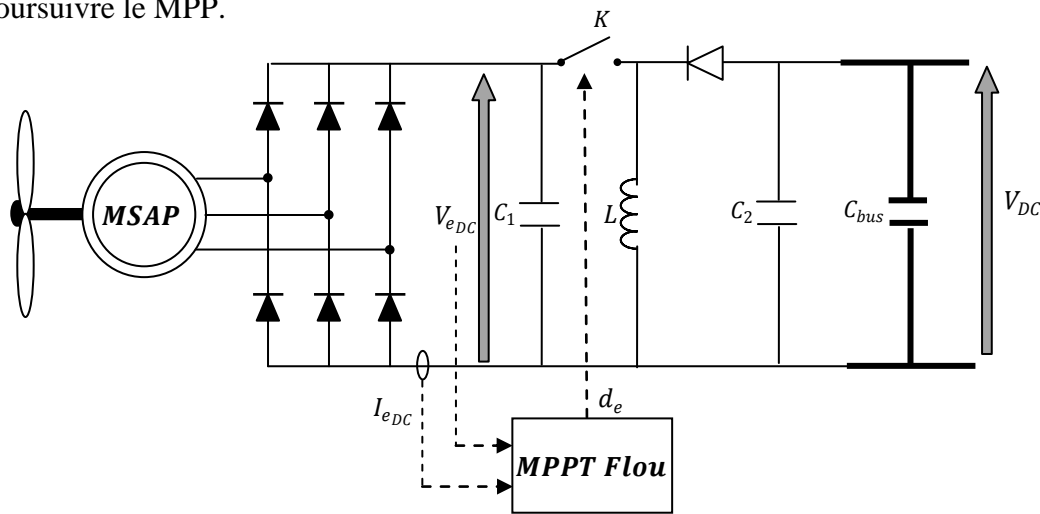


Figure III.14. Schéma de la chaîne de conversion éolienne avec MPPT flou

Ayant ces deux grandeurs : puissance éolienne P_e et la tension continue après le pont de diodes V_{eDC} , . On peut extraire le maximum d'énergie éolienne en poursuivant le MPP sur la caractéristique Puissance-Tension continue de pont de diodes (P_e en fonction de V_{eDC}) comme illustrée dans la figure (II.16). La poursuite peut être réalisée par un algorithme classique, comme P&O (Perturbe and Observation) [Mol_06], où par une méthode intelligente qui attient le MPP rapidement en adaptant le pas de recherche.

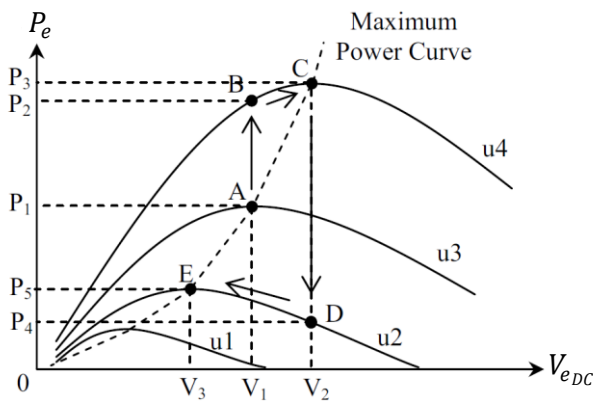


Figure III.15. Caractéristique P_e en fonction de V_{eDC} [Qin_08]

On remarque que la caractéristique $P_e - V_{eDC}$ de l'éolienne se semble beaucoup à celle du générateur photovoltaïque $P_{PV} - V_{PV}$ (illustrée précédemment dans la figure III.13). Pour cette raison, le principe de suivi du MPP par un contrôleur flou sera le même.

Le choix des variables d'entrées du contrôleur flou sera, comme pour le système photovoltaïque, l'erreur (E_e) et le changement de l'erreur (ΔE_e) à des instants échantillonnés (k), exprimées comme suit :

$$E_e(k) = \frac{P_e(k) - P_e(k-1)}{V_{eDC}(k) - V_{eDC}(k-1)} \quad (III.8)$$

$$\Delta E_e(k) = E_e(k) - E_e(k-1) \quad (III.9)$$

Comme dans le contrôleur MPPT flou du système photovoltaïque, l'erreur $E_e(k)$ détermine la position du point de fonctionnement par rapport au MPP, et le changement de l'erreur ΔE_e la direction du point de fonctionnement.

On utilise les mêmes fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sortie du régulateur flou utilisée pour le régulateur du système photovoltaïque. Seulement, on change les limites minimales L_{min} et maximales L_{max} de chaque entrée et sortie car elles dépendent du système éolien.

La table d'inférence reste presque la même que pour celle appliquée sur le système photovoltaïque. Elle est représentée par la table avec les entrées : l'erreur E_e et la variation de l'erreur ΔE_e , et la sortie qui est Δd_e .

Finalement, la méthode centroïde est utilisée pour la défuzzification.

III.3.3. Le contrôleur flou appliqué à la stabilisation du bus continu

La régulation de la tension continue a fait l'objet de plusieurs travaux [Kar_03][Sch_06]. Cette régulation sur le bus continue est mise en œuvre par l'hacheur réversible en courant connecté au banc de batteries. Quand l'énergie fournie par les sources renouvelable est insuffisante pour faire face à une augmentation soudaine de la charge, la tension du bus continu devient inférieure à la valeur de référence. Dans ce cas, l'énergie manquante est obtenue à partir des batteries. Au contraire, quand il existe un excès d'énergie, il est utilisé pour recharger les batteries, ou bien il est injecté dans le réseau si la maison est connectée au réseau électrique.

La tension de bus continue V_{DC} doit être maintenue à la valeur de référence V_{DCref} . Cette tension de référence est fixée à la tension nominale de fonctionnement des batteries.

On peut assurer cette régulation en utilisant un régulateur flou, qui agit sur le rapport cyclique du hacheur réversible en courant, comme montré dans la figure (III.16).

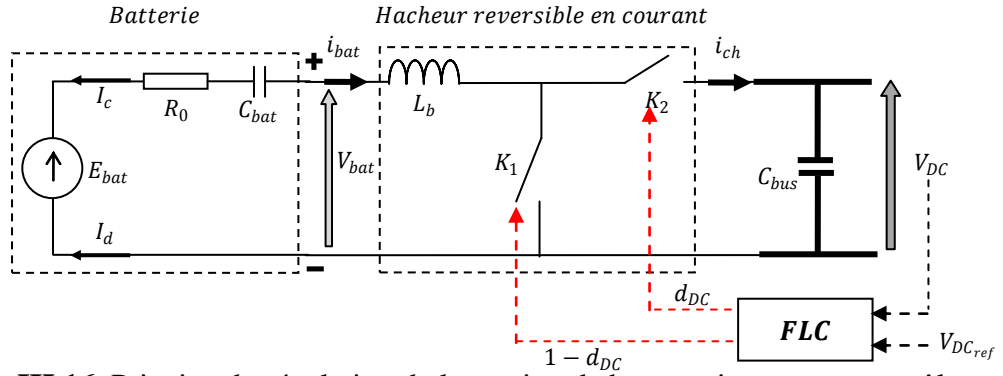


Figure III.16. Principe de régulation de la tension de bus continu par un contrôleur flou (FLC)

Les entrées et la sortie du régulateur flou sont choisies de la façon suivante :

- l'erreur (E_{DC}) qui est représentée l'écart entre la tension V_{DC} du bus continu et la tension de référence $V_{DC_{ref}}$ à des instants échantillonnés (k), elle est défini comme :

$$E_{DC}(k) = V_{DC}(k) - V_{DC_{ref}}(k) \quad (III.10)$$

- et le changement de l'erreur (ΔE_{DC})

$$\Delta E_{DC}(k) = E_{DC}(k) - E_{DC}(k - 1) \quad (III.11)$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sortie du régulateur flou sont les mêmes que celles qui sont utilisées précédemment dans les régulateurs flous assurant les MPPT. Avec une adaptation des limites des variables d'entrées et la sortie : $L_{E_{DC} min}$ et $L_{E_{DC} max}$ pour l'erreur E_{DC} ;

- $L_{\Delta E_{DC} min}$ et $L_{\Delta E_{DC} max}$ pour l'erreur ΔE_{DC} ;
- et $L_{\Delta d_{DC} min}$ et $L_{\Delta d_{DC} max}$ pour la sortie Δd_{DC} .

Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E_{DC} converge toujours vers Zéro, c.à.d. il faut que : $E_{DC}(k) \cdot \Delta E_{DC}(k) < 0$.

Pour cela, on a choisi la table d'inférence de la façon suivante, pour les entrées E_{DC} et ΔE_{DC} , et pour la sortie Δd_{DC} .

Δd_{DC}		ΔE_{DC}				
		NG	NP	Z	PP	PG
E_{DC}	NG	NG	NG	NG	Z	Z
	NP	NP	NP	NP	Z	Z
	Z	PP	Z	Z	Z	NP
	PP	Z	Z	PP	PP	PP
	PG	Z	Z	PG	PG	PG

Tableau III.3. Table de règles floues appliquée pour la régulation de la tension du bus continu.

On remarque que la table d'inférence utilisée ici est la même que celle des MPPT flous traités précédemment.

La méthode centroïde est la méthode de défuzzification utilisée pour la régulation de la tension du bus continu.

III.3.4. Le contrôleur flou appliqué au système de production d'eau chaude

III.3.4.1. Contrôle de la température d'eau chaude sanitaire

Le principal réglage d'une installation solaire est de commander la pompe de collecteur, de telle manière que l'énergie solaire offerte puisse être utilisée de manière optimale. A l'aide d'une sonde de température placée dans le réservoir, le régulateur flou surveille la température de l'eau du réservoir T_s .

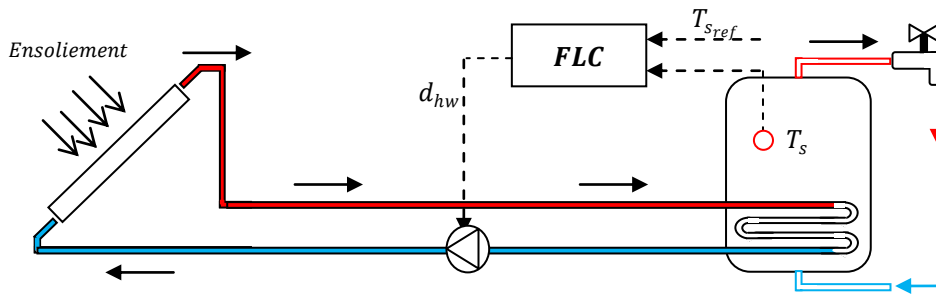


Figure III.17. Schéma de réglage de la température d'eau chaude sanitaire

Si la température de l'eau T_s baisse sous la température de l'eau désirée T_{sref} , le régulateur augmente d_{HW} pour que la pompe de collecteur soit branchée plus longtemps pendant un temps égale à $d_{HW} \cdot T_{HW}$. Où, T_{HW} est la période de commutation de la pompe de l'ordre des minutes, et d_{HW} est le rapport cyclique de commutation de la pompe ($d_{HW} \in [0, 1]$). Quand la température de l'eau devient plus proche de la température T_{sref} , le régulateur flou diminue le rapport cyclique d_{HW} , pour décélérer le transfert de chaleur entre le collecteur et le réservoir de stockage.

Les entrées et la sortie du régulateur flou, ainsi que leurs fonctions d'appartenance, sont choisies de la même façon du régulateur de la tension de bus continu. Avec une adaptation des limites des fonctions d'appartenances des entrées et la sortie.

Les entrées du régulateur seront :

- l'erreur (E_{HW}) qui est la différence entre la température de l'eau dans le réservoir de stockage T_s et la température de l'eau désirée T_{sref} :

$$E_{HW}(k) = T_s(k) - T_{sref}(k) \quad (III. 12)$$

- et le changement de l'erreur (ΔE_{HW})

$$\Delta E_{HW}(k) = E_{HW}(k) - E_{HW}(k - 1) \quad (III.13)$$

La table d'inférence et la méthode de déffuzification restent les mêmes que celles utilisée dans la régulation de la tension du bus continu.

III.3.4.2. Contrôle de la température d'une chambre de la maison

En vue de l'optimisation de l'énergie et pour mieux exploiter l'énergie solaire thermique reçue par les capteurs thermiques. On a exploité l'eau chaude stockée dans le réservoir pour chauffer une des pièces de notre maison à énergie positive. Quand on veut augmenter la température de la chambre T_c , on fait circuler l'eau chaude dans un chauffage auxiliaire par une pompe commandée et vice-versa.

Pour asservir la température de la chambre à suivre la température désirée T_{cref} , on commande la pompe qui fait circuler l'eau chaude dans le chauffage auxiliaire par un régulateur flou. Ce dernier fonctionne exactement comme celui qui contrôle la température de l'eau chaude sanitaire. Le régulateur augmente le rapport cyclique d_{CH} de la commutation de la pompe quand la température ambiante de la chambre est inférieure à la température désirée, et vice-versa. La période de commutation de la pompe T_{CH} est de l'ordre de minutes car le système est très lent.

Puisque le principe de contrôle pour la régulation de la température ambiante de la chambre utilisé est le même que celui de la régulation de la température d'eau sanitaire : les entrées et la sortie du régulateur flou, les fonctions d'appartenance, la table d'inférence et la méthode de déffuzification, sont choisies de la même façon. Avec une adaptation des limites des fonctions d'appartenances des entrées et la sortie.

Donc l'erreur (E_{CH}) et

Donc les entrées du régulateur : l'erreur (E_{CH}) et le changement de l'erreur (ΔE_{HW}) seront définis comme suit :

$$E_{CH}(k) = T_c(k) - T_{cref}(k) \quad (III.14)$$

$$\Delta E_{CH}(k) = E_{CH}(k) - E_{CH}(k - 1) \quad (III.15)$$

III.3.5. Gestion des Commutations

Considérons un système composé de plusieurs sous-systèmes. Si on arrive à commander ce système avec un seul régulateur, en faisant commuter entre les entrées et les sorties des sous-systèmes (comme montré dans la figure III.19), le contrôleur est dit contrôleur uniforme [Zhe_10]. Donc le système est un système à commutation.

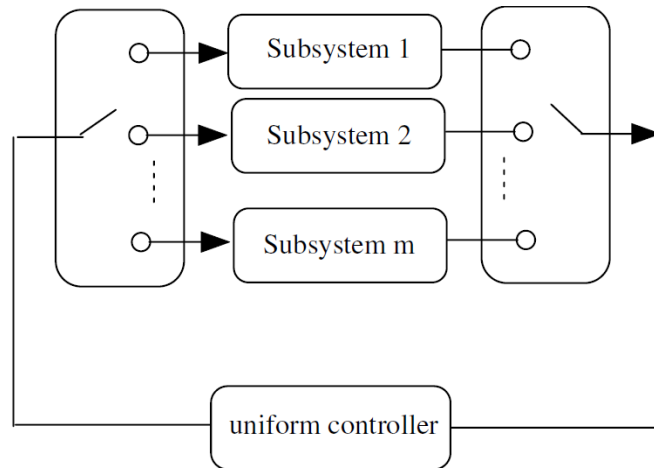


Figure III.18. Diagramme Illustratif d'un contrôleur uniforme [Zhe_10].

Dans notre cas si on considère que les sous-systèmes suivants : photovoltaïque, éolien, bus continu, production d'eau chaude, et régulation de la température ambiante représentent un seul système et si on arrive à commander ce système avec un seul régulateur flou, dans ce cas, le régulateur flou est dit régulateur uniforme.

On a remarqué précédemment que les régulateurs flous synthétisés pour les sous-systèmes, mentionnés ci-dessus, partagent : le même nombre des variables d'entrées et sortie, les mêmes fonctions d'appartenance, et la même table d'inférence. Seulement les fonctions d'appartenance sont dans différentes échelles. Il faut les adapter pour normaliser les fonctions d'appartenances du régulateur flou unique. L'adaptation est faite par des gains $G_s i$, tels que :

G : le gain

s : sous-système qui peut être photovoltaïque (pv), éolien (eol), bus continu (dc), production d'eau chaude sanitaire (hw), ou régulation de la température de la chambre (t).

i : prends les valeur 1,2 et 3 pour l'entrée (l'erreur $E(k)$), l'entrée (changement d'erreur $\Delta E(k)$), et pour la sortie (variation du rapport cyclique $\Delta d(k)$), respectivement.

Le régulateur gère les différentes entrées et sorties à travers trois commutateurs, deux pour ces entrées et le troisième pour sa sortie. Ces commutateurs sont synchronisés. Ils fonctionnent au même temps pour recevoir les deux signaux d'entées d'un sous-système, calculer la valeur de sortie et l'envoyer au même sous-système dans la même période de commutation.

La commutation donne la priorité aux systèmes photovoltaïque et éolien à cause des variations rapides et surprenantes des conditions climatiques. Donc la commutation entre ses deux sous-systèmes va être d'ordre des millisecondes (dans notre cas 2 ms pour chaque sous-système). La dynamique, de bus continu et batteries, est un peu plus lente et la commutation vers ce sous-système est de l'ordre des millisecondes, mais elle est plus lente que les systèmes Photovoltaïque et éolien à

cause de la dynamique des batteries. Finalement, les systèmes thermiques sont caractérisés par leur dynamique très lente par rapport aux systèmes électriques. Donc, les minutes sont l'ordre de commutation des sous-systèmes de production d'eau chaude sanitaire et la régulation de la température. Des buffers sont ajoutés dans chaque entrées et sorties des sous-systèmes pour maintenir leurs valeurs jusqu'à la prochaine commutation.

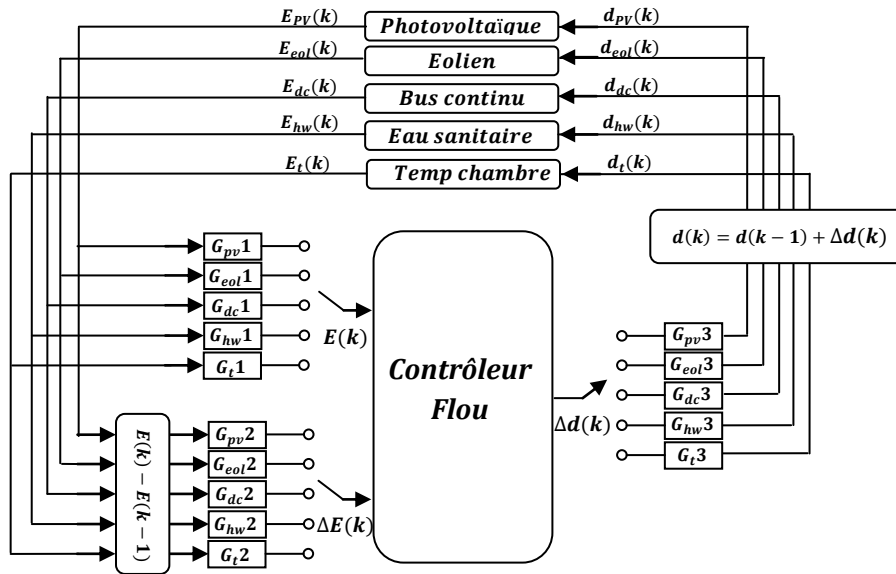


Figure III.19. Fonctionnement de commutation du régulateur flou

III.4. Commande de l'onduleur par les modes glissants

La commande par mode glissant est une technique intéressante permettant de résoudre le problème de la non robustesse du réglage vis à vis des variations des paramètres internes du système. Elle a prouvé sa robustesse dans son application sur les convertisseurs électriques dans [Bou_91][Bou_89]. La loi de commande dans cette technique est formée principalement à partir de la grandeur à régler et un certain nombre de ses dérivées [Bul_86].

III.4.1. Conception de la commande par mode de glissement

La commande par mode de glissements comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre, discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence; cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et des perturbations sur le modèle [Bou_91].

La conception des régulateurs par mode de glissements prend en compte les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

1. Choix de la surface de glissement.
2. L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
3. Détermination de la loi de commande.

III.4.1.1. choix de la surface de glissement

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase [Zah_00]. Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé.

En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x} = A x + B u \quad (\text{III. 16})$$

Pour un vecteur de commande u de dimension m , il faut choisir m surfaces de glissement.

Pour ce qui est de la forme de la surface, J.J. Slotine [Slo_91] nous propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_{ref} .

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III. 17})$$

Avec

x : variable à réguler.

$e(x)$: l'écart de la variable à réguler ($x_{ref} - x$)

λ_x : constante positive.

r : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour $r > 1$, $S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ_x . Donc, on est en face d'un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro.

III.4.1.2. Condition d'existence et de convergence

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système, dans le plan de phase de converger vers la surface de glissement. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence :

a) La fonction directe de commutation

La première condition de convergence a été proposée par Utkin [Utk_77]. Elle consiste à donner une dynamique à la surface convergente vers zéro. Elle est exprimée par :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III. 18})$$

b) La fonction de LYAPUNOV

La deuxième condition de convergence consiste à formuler une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$). La loi de commande doit faire décroître cette fonction.

On peut définir la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \tag{III.19}$$

La dérivée de cette fonction nous donne :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \tag{III.20}$$

Pour assurer la décroissance de la fonction de LYAPUNOV, il faut assurer $\dot{V}(x) < 0$.

III.4.1.3. Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement choisie ainsi que la vitesse de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre (origine du plan de phase) en maintenant la condition d'existence du mode de glissement.

La structure d'un contrôleur comporte deux parties, une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante [Dah_04]. Cette dernière est très importante dans la technique de commande non linéaire car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et les perturbations extérieures.

$$u = u_{eq} + u_n \tag{III.21}$$

- u_{eq} : est la commande équivalente ; elle correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement. Elle est introduite en considérant que : $S(x) = 0$. Elle peut être interprétée comme la valeur moyenne (continue) que prend la commande lors de la commutation rapide entre U_{max} et U_{min} .

- u_n : est déterminée pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers la surface et satisfaite la condition de convergence

Pour avoir l'expression analytique de la commande, on considère le système décrit par l'équation (III.16), nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x^T} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} [A x + B(u_{eq} + u_n)] \tag{III.22}$$

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x^T} [A x + B u_{eq}] + \frac{\partial S}{\partial x^T} B u_n \tag{III.23}$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle $S(x) = 0$, et par conséquent sa dérivée $\dot{S}(x)$ et la partie discontinue u_n sont aussi nulles [Zah 00]. D'où on déduit l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial S}{\partial x^T} B \right]^{-1} \left[\frac{\partial S}{\partial x^T} A x \right] \quad (III.24)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que [Bou_91]:

$$\frac{\partial S}{\partial x^T} B \neq 0 \quad (III.25)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par son expression (III.24) dans l'équation (III.23), nous obtenons l'expression de la dérivée de la surface suivante :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x^T} B u_n \quad (III.26)$$

La condition d'attractivité exprimée dans (III.26) devient :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = \dot{S}(x) \frac{\partial S}{\partial x^T} B u_n < 0 \quad (III.27)$$

Donc, le signe de u_n doit être opposé de celui de $\dot{S}(x) \frac{\partial S}{\partial x^T} B$.

La forme la plus simple que peut prendre u_n est :

$$u_n = K \text{ sign} (S(x)) \quad (III.28)$$

Le choix de la constante K est très influant, car si la constante K est très petite le temps de réponse est trop long et si elle est trop grande, le « Chattering » apparaît.

III.4.2. Application de la commande par mode de glissement à l'onduleur triphasé

Dans cette étude, nous établirons les expressions des valeurs de commande en s'appuyant sur le modèle de l'onduleur avec le filtre de sortie établi au chapitre précédent. Rappelons le modèle qui a été représenté par le système d'équations suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \\ i_{id} \\ i_{iq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{3C_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3C_f} \\ \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \\ i_{id} \\ i_{iq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{2C_f} & \frac{1}{2\sqrt{3}C_f} \\ \frac{-1}{2\sqrt{3}C_f} & \frac{-1}{2C_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

On remarque qu'on peut diviser le système en deux sous systèmes, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ i_{id} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{3C_f} \\ -\frac{1}{L_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ i_{id} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{cq} \\ i_{iq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{3C_f} \\ -\frac{1}{L_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cq} \\ i_{iq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} v_q + \begin{bmatrix} d_2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Où d_1 et d_2 représentent les perturbations pour le système. Ils s'agissent des courants passant dans la charge, et peuvent même représenter le courant injecté dans le réseau électrique.

Les deux sous systèmes se ressemblent beaucoup, et si on enlève les termes de perturbations, les deux sous systèmes seront identiques. Pour cela, on va traiter qu'un seul sous système dans ce qui suit. Donc on va synthétiser qu'une seule commande par le mode glissant et elle va être appliquée pour les deux sous système.

En mettant $\alpha = 1/3C_f$, $\beta = 1/L_f$, $[x_1 \ x_2]^T = [V_{cd} \ i_{id}]^T$, u et d représentent la commande et perturbation ; respectivement qui peuvent être v_d et d_1 pour le premier sous-système ou v_q et d_2 pour le deuxième sous-système. Le modèle du sous-système qu'on va utiliser dorénavant peut être mis sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ -\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

Etant donnée que la sortie de notre système qu'on veut la commandée est la tension représentée par x_1 . Ce système est d'ordre relatif $r = 2$, car on doit dériver la sortie x_1 deux fois pour que la commande apparaisse.

Trois surfaces de glissement vont être appliquées sur ce système en vu d'obtenir les commandes équivalentes. La première est la surface de Slotine, décrite précédemment par l'équation (III.17). La deuxième surface est une surface non linéaire développée et testée dans [Bou_03], ensuite elle a été testée pour autres systèmes [Bou_09]. La troisième surface va être synthétisée par la méthode de Backstepping [Bou_98].

III.4.2.1. Mode de glissement avec surface de Slotine

Rappelons la forme de la surface de Slotine [Slo_91]:

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.32})$$

Le degré relatif est égale à 2 et l'erreur $e(x)$ est donnée par :

$$e(x) = e(x_1) = x_1 - x_{1ref} \quad (\text{III.33})$$

Donc la surface qu'on va utiliser sera :

$$S_1(x) = \dot{e}(x_1) + \lambda_1 e(x_1) = (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}) + \lambda_1 (x_1 - x_{1ref}) \quad (III.34)$$

$$S_1(x) = \alpha x_2 + d - \dot{x}_{1ref} + \lambda_1 (x_1 - x_{1ref}) \quad (III.35)$$

En dérivant la surface $S_1(x)$ donnée par l'équation (III.35), on obtient :

$$\dot{S}_1(x) = \alpha \dot{x}_2 + \dot{d} - \ddot{x}_{1ref} + \lambda_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}) \quad (III.36)$$

$$\dot{S}_1(x) = -\alpha \beta x_1 + \alpha^2 u + \dot{d} - \ddot{x}_{1ref} + \lambda_1 (\alpha x_2 + d - x_{1ref}) \quad (III.37)$$

La commande équivalente peut être obtenue en mettant $\dot{S}_1(x) = 0$.

$$u_{eq1} = \frac{1}{\alpha^2} (\alpha \beta x_1 - \dot{d} + \ddot{x}_{1ref} - \lambda_1 (\alpha x_2 + d - x_{1ref})) \quad (III.38)$$

En choisissant la commande u_n de la forme suivante :

$$u_{n1} = K_{11} \text{sign}(S_1(x)) + K_{12} S_1(x) \quad K_{11}, K_{12} > 0 \quad (III.39)$$

La commande par mode de glissement est définie comme :

$$u_1 = u_{eq1} u_{n1} \quad (III.40)$$

D'où :

$$u_1 = \frac{1}{\alpha^2} (\alpha \beta x_1 - \dot{d} + \ddot{x}_{1ref} - \lambda_1 (\alpha x_2 + d - x_{1ref})) + K_1 \text{sign}(S_1(x)) + K_{12} S_1(x) \quad (III.41)$$

III.4.2.2. Mode de glissement avec surface non linéaire

La surface qu'on va utiliser maintenant $S_2(x)$ a été prouvée par un théorème et validé par des résultats expérimentaux dans [Bou_03][Bou_09]. C'est une surface non linéaire de premier ordre avec un terme intégral non linéaire. Elle est définie par l'équation suivante :

$$S(e) = \dot{e} + \Lambda_1(e) + \Lambda_2(z) \quad (III.42)$$

Avec : $\Lambda_{1,2}$ sont des fonctions continues Lipchitziennes, et $z = \int_0^t e(t)dt$.

La fonction tangente sigmoïde Λ est une fonction continue Lipchitzienne. Elle vérifie les conditions suivantes [Bou_09]:

1. $\Lambda(x).x > 0 \quad \forall x \neq 0$
2. $\Lambda(0) = 0$
3. $|z| \leq \varepsilon \Rightarrow |\Lambda(z)| \geq \frac{|z|}{\varepsilon} (1 - \varepsilon)$ et $|z| \geq \varepsilon \Rightarrow |1 - \Lambda(z)\text{sign}(z)| \leq \varepsilon$

Elle est représentée par la figure (III.20) et définie par l'expression suivante :

$$\begin{cases} \Lambda(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 & , \mu > 0 \\ \text{et} \\ \frac{d\Lambda(x)}{dx} = \frac{\mu}{2} [1 - \Lambda(x)^2] \end{cases} \quad (\text{III. 43})$$

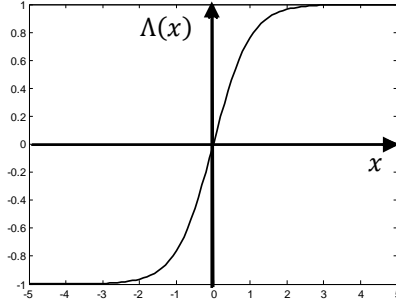


Figure III.20. La fonction tangente sigmoïde

Dans ce travail, la fonction tangente sigmoïde Λ est utilisée pour représenter les fonctions Λ_1 et Λ_2 comme dans [Bou_09].

Sachant que $e = x_1 - x_{1ref}$, et en remplaçant les fonctions Λ_1 et Λ_2 par la fonction sigmoïde définie préalablement Λ , la surface $S_2(x)$ devient de la forme suivante :

$$S_2(x) = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref} + \Lambda(x_1 - x_{1ref}) + \Lambda\left(\int_0^t (x_1 - x_{1ref}) dt\right) \quad (\text{III. 44})$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{S}_2(x) = -\alpha \beta x_1 + \alpha^2 u + \dot{d} - \ddot{x}_{1ref} + \varphi_1 + \varphi_2 \quad (\text{III. 45})$$

Avec :

$$\varphi_1 = \frac{\mu}{2} [1 - \Lambda(x_1 - x_{1ref})^2], \varphi_2 = \frac{\mu}{2} \left[1 - \Lambda\left(\int_0^t (x_1 - x_{1ref}) dt\right)^2\right] \quad (\text{III. 46})$$

Durant le mode de glissement, la dérivée de la surface s'annule, d'où l'expression de la commande équivalente sera :

$$u_{eq2} = \frac{1}{\alpha^2} (\alpha \beta x_1 - \dot{d} + \ddot{x}_{1ref} - \varphi_1 - \varphi_2) \quad (\text{III. 47})$$

On choisit la commande u_n de la façon suivante :

$$u_{n2} = K_{21} \text{sign}(S_2(x)) + K_{22} S_2(x) \quad K_{21}, K_{22} > 0 \quad (\text{III. 48})$$

La commande u_2 sera :

$$u_2 = \frac{1}{\alpha^2} (\alpha \beta x_1 - \dot{d} + \ddot{x}_{1ref} - \varphi_1 - \varphi_2 + K_2 \text{sign}(S_2(x)) + K_{22} S_2(x)) \quad (\text{III. 49})$$

III.4.2.3. Surface de glissement synthétisée par Backstepping

Dans cette section, l'idée principale est l'utilisation de l'approche Backstepping pour concevoir la surface de glissement [Bou_98][Ben_98] commandant l'onduleur. Notre but est de construire une stratégie de commande u pour conduire les états de l'onduleur à la surface $S_3(x)$, en utilisant l'approche Backstepping. Pour cela, il faut suivre les étapes suivantes :

Étape 1. Le premier objectif est de faire x_1 poursuivre x_{1ref} , donc on peut représenter l'erreur de poursuite e comme $e = x_1 - x_{1ref}$. La dérivée de l'erreur est donnée par :

$$\dot{e} = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref} = \alpha x_2 + d - \dot{x}_{1ref} \quad (III.50)$$

Pour entamer la méthode de Backstepping, on admet que $\phi_1 = \alpha x_2$ constitue une commande virtuelle pour stabiliser e à l'origine.

La fonction de Lyapunov est donnée par $V(e) = \frac{1}{2}e^2$, pour obtenir sa dérivée définie négative, la commande virtuelle peut être choisie comme :

$$\phi_1 = -\gamma e - d + \dot{x}_{1ref} \quad (III.51)$$

Donc :

$$\dot{V}(e) = -\gamma e^2 \leq 0 \quad , \gamma > 0 \quad (III.52)$$

Étape 2. On choisit la surface de glissement S_3 de la façon suivante :

$$S_3 = \alpha x_2 - \phi_1 = \alpha x_2 + \gamma e + d - \dot{x}_{1ref} \quad (III.53)$$

La fonction de Lyapunov augmentée $V(e, S_3)$ sera :

$$V(e, S_3) = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}S_3^2 \quad (III.54)$$

Sa dérivée est

$$\dot{V}(e, S_3) = -\gamma e^2 + S_3 \dot{S}_3 \quad (III.55)$$

Avec :

$$\dot{S}_3 = -\alpha \beta x_1 + \alpha^2 u + \gamma (\alpha x_2 + d - \dot{x}_{1ref}) + \dot{d} - \ddot{x}_{1ref} \quad (III.56)$$

Pour que la fonction de Lyapunov augmentée $V(e, S_3)$ soit définie négative, il faut que $S_3 \dot{S}_3$ soient inférieures à zéro. Pour cela, on a choisit \dot{S}_3 telle que :

$$\dot{S}_3 = -K_{31} \text{sgn } S_3 - K_{32} S_3 \quad K_{31}, K_{32} > 0 \quad (III.57)$$

D'après les équations (x) et (y), on déduit la commande mode glissant u_3 . Elle est donnée par :

$$u_3 = \frac{1}{\alpha^2} (\alpha \beta x_1 - \gamma (\alpha x_2 + d - \dot{x}_{1ref}) - \dot{d} + \ddot{x}_{1ref} - K_{31} \text{sgn } S_3 - K_{32} S_3) \quad (III.58)$$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel sur la commande par logique floue, puis nous avons vu son application dans l'optimisation des générateurs photovoltaïques et éoliens poursuivant leur point de puissance maximale. Nous avons aussi vu comment, avec le régulateur flou, on peut stabiliser la tension de bus continu ; régler la température de l'eau chaude sanitaire, et régler la température ambiante de la chambre. Puis nous avons abordé la notion de régulateur uniforme qui s'est appliquée, dans notre cas, sur le régulateur flou parce qu'il a pu assurer la commande de tous les sous-systèmes cités ci-dessus.

La tension de sortie de l'onduleur, qui doit répondre à certaines normes et exigences, a été commandée par le mode glissant. Une commande qui a montré sa robustesse surtout dans les convertisseurs électriques. Trois surfaces de glissement sont étudiées pour synthétiser la commande : la première était celle de Slotine, la deuxième est non linéaire, et la troisième a été obtenue par la méthode backstepping.

Chapitre IV :

Simulations et Résultats

IV.1. Introduction

Les logiciels de simulations sont des outils puissants qui testent et évaluent l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécution du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlées. La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation de la maison à énergie positive avec la commande hybride sous plusieurs conditions. Ces résultats nous permettent de valider les concepts théoriques de chaque commande de la commande hybride. Commenant par l'évaluation des méthodes MPPT flou appliquées sur les systèmes photovoltaïque et éolien, passant à la stabilisation de la tension de bus continu, et la régulation de la température d'eau et de la chambre par le même régulateur flou. Finalement, des simulations de la tension de sortie de l'onduleur, commandé par les modes glissants, sont faites pour trois surfaces de glissement différentes.

IV.2. Simulation de la chaine de production photovoltaïque

IV.2.1. Comportement du système photovoltaïque sans contrôleur MPPT

Pour simuler le système sans contrôleur MPPT flou, le générateur photovoltaïque a été branché directement sur le bus continu. Ça peut être réalisé, sans modifier à la structure, en fixant le rapport cyclique du hacheur buck-boost à 0.5. Cette simulation nous permet de voir l'intérêt d'utiliser des contrôleurs MPPT. La figure (IV.1) montre le fonctionnement du système sans contrôleur MPPT.

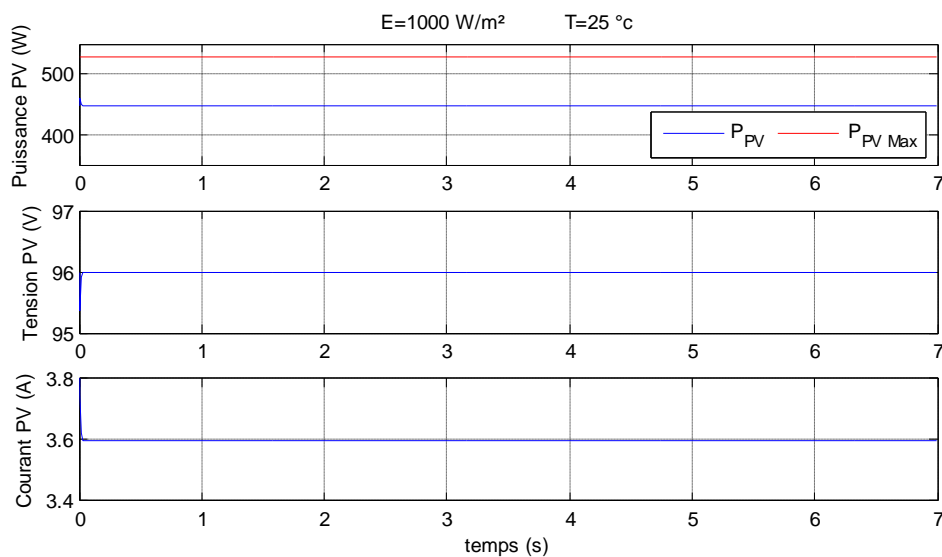


Figure IV.1. Comportement du système sans contrôleur MPPT

Les résultats de simulation obtenu sur la figure (IV.1) montre que la puissance délivrée par le générateur atteint 448.38 W , les conditions météorologiques sont telles que l'ensoleillement 1000 W/m^2 et la température 25°C , sous ces conditions, le générateur devrait délivrer 527.48 W . Comme le système ne possède pas de mécanisme d'adaptation de la tension, le système ne fonctionnera pas à sa puissance maximale. D'où on confirme la nécessité d'introduire les MPPT.

IV.2.2. Fonctionnement du système photovoltaïque sous des conditions constantes

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température égale à 25°C et l'ensoleillement à 1000 W/m^2 . Le but de cette simulation est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP.

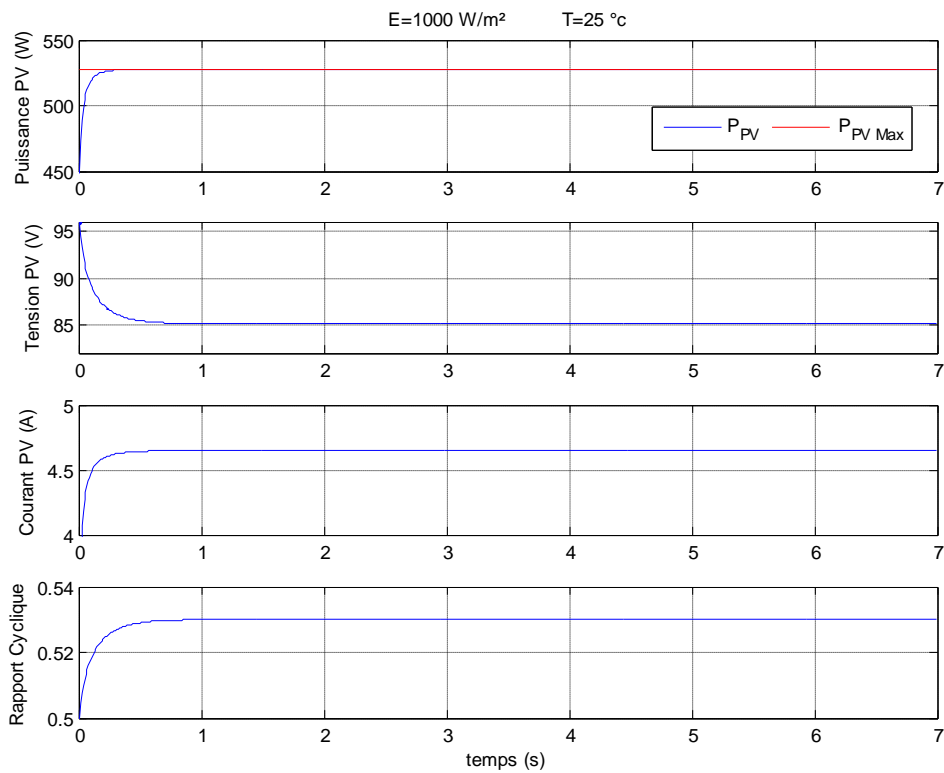


Figure IV.2. Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et un ensoleillement de 1000 W/m^2 .

IV.2.3. Fonctionnement sous des conditions météorologiques variables

a) Comportement du système face à un changement de l'éclairement

Afin d'évaluer le temps de réponse de mécanisme de poursuite, le système photovoltaïque est soumis à des variations des conditions de l'ensoleillement. Les ombres des structures, de la végétation, et des nuages auront comme conséquence des changements soudains de l'insolation, qui mènent à leur tour à un changement correspondant de la température des cellules.

Pour voir le comportement du système face aux changements de l'éclairement on va lui faire subir les tests, en variant l'enseillement brutalement et lentement.

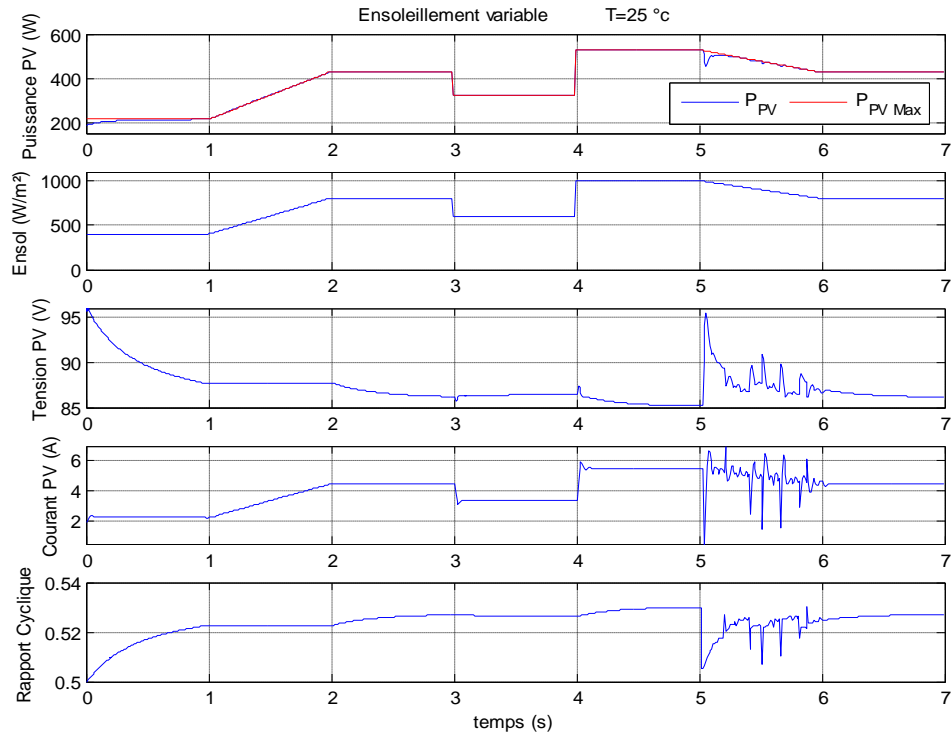


Figure IV.3. Réponse du système photovoltaïque à des variations de l'enseillement et à une température de 25 °C.

b) Comportement du système face à un changement de température

En plus de l'enseillement, la température de la cellule solaire est un facteur important qui influe sur les caractéristiques du panneau solaire.

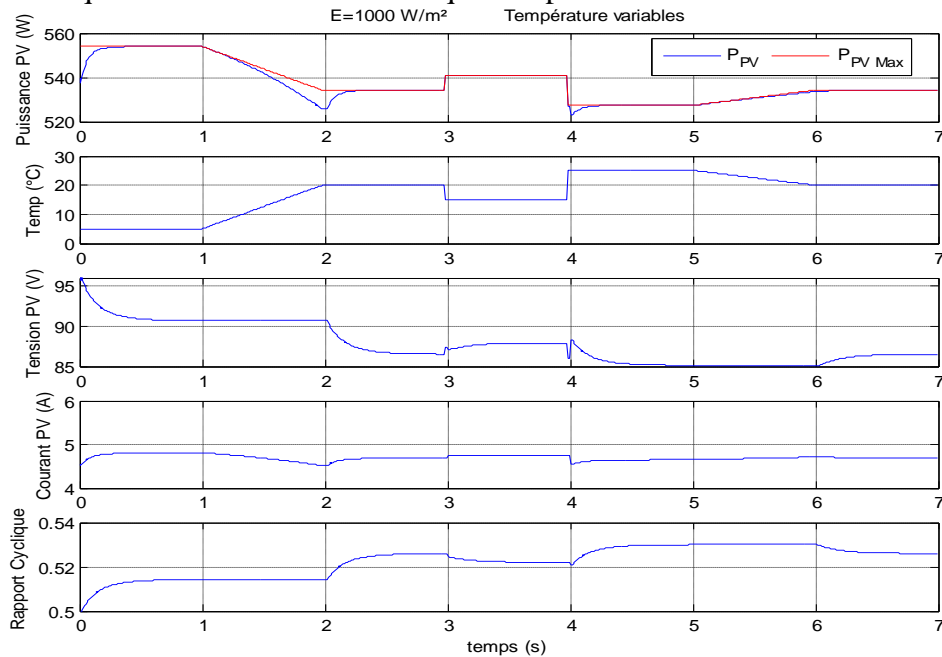


Figure IV.4. Réponse du système photovoltaïque à des variations de la température.

IV.2.4. Fonctionnement sous des variations de la tension de bus continu

La tension de bus continu représente la charge de système dans notre cas. Pour tester la robustesse du contrôleur MPPT flou envers la variation de la tension de bus continu. Sous les conditions météorologiques normales, on a fait chuter la tension de bus continu brutalement et progressivement pour voir si le contrôleur extrait toujours le maximum de la puissance.

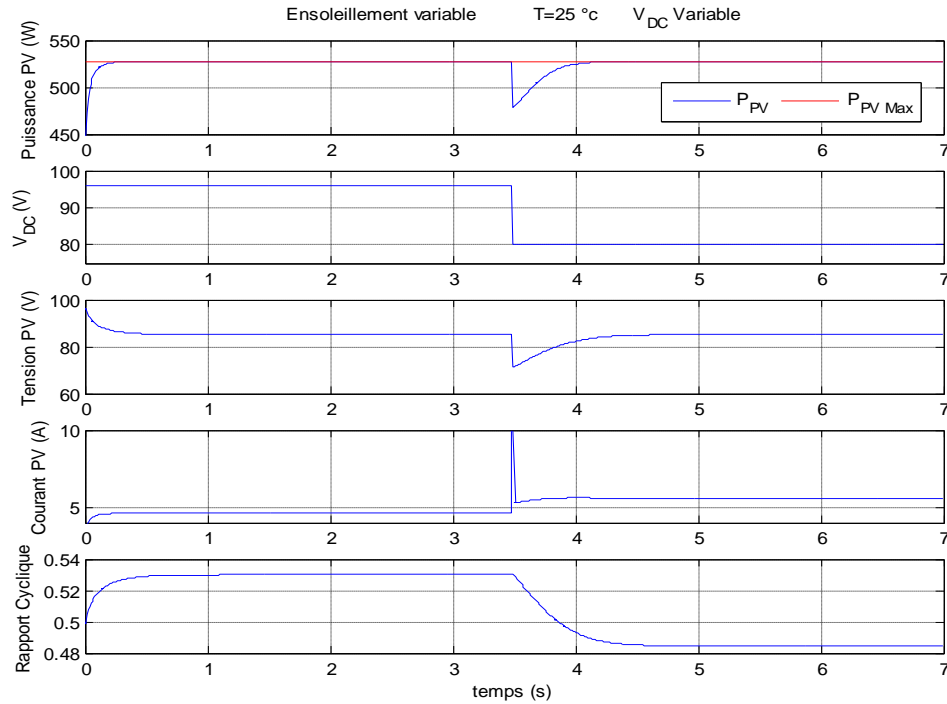


Figure IV.5. Réponse du système photovoltaïque à une variation brutale de la tension de bus continu à $t = 3.5$ s.

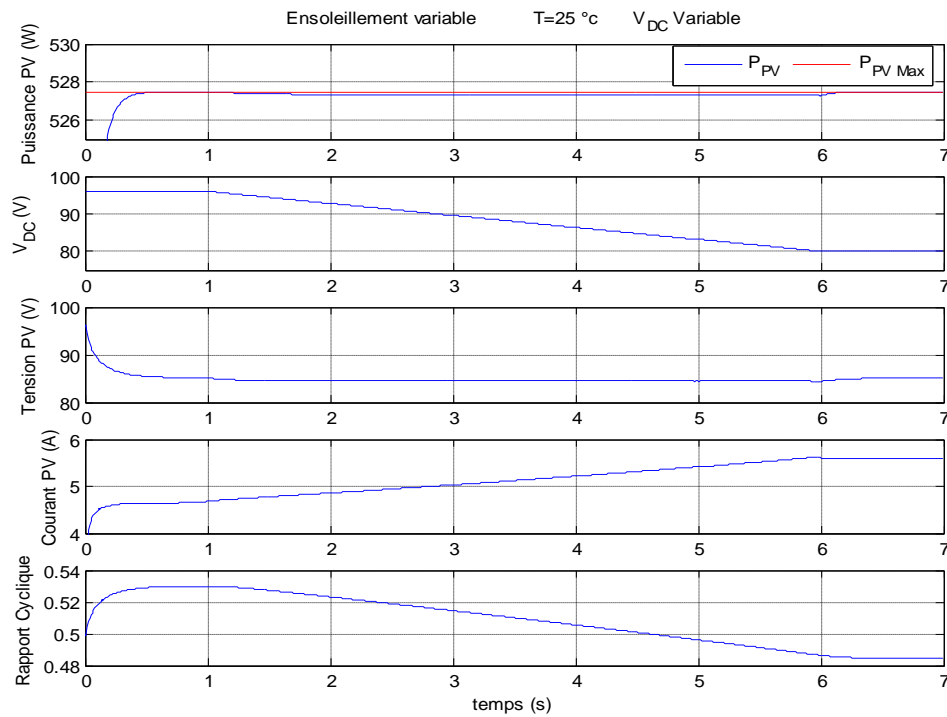


Figure IV.6. Réponse du système à une variation lente de la tension de bus continu.

IV.2.5. Exemple de la production photovoltaïque sur une journée

Dans cet exemple nous voulons illustrer la puissance produite par notre chaîne de conversion photovoltaïque durant une journée ensoleillée. Les profils de l'ensoleillement et de la température sont présentés de la figure IV.6, la réponse de la puissance qui les correspond est illustrée dans la figure IV.7.

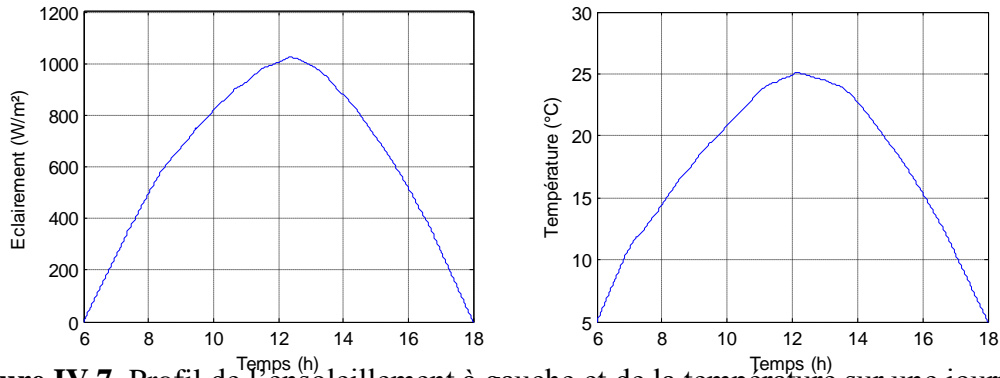


Figure IV.7. Profil de l'ensoleillement à gauche et de la température sur une journée.

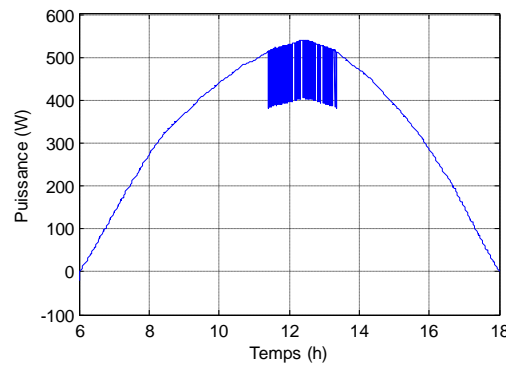


Figure IV.8. Exemple de la puissance produite par le système PV pour une journée

En calculant la surface contenu dans le profil de la puissance pendant une journée, on trouve que l'énergie maximisée et délivrée par le système de conversion photovoltaïque est plus de 4 KWh.

IV.3. Simulation de la chaîne de production éolienne

IV.3.1. Comportement du système éolien sans contrôleur MPPT

Comme on a fait pour le système photovoltaïque, on va simuler le système éolien complet (turbine éolienne, MSAP, pont de diode, hacheur buck-boost) sans commande MPPT, pour bien confirmer sa nécessité.

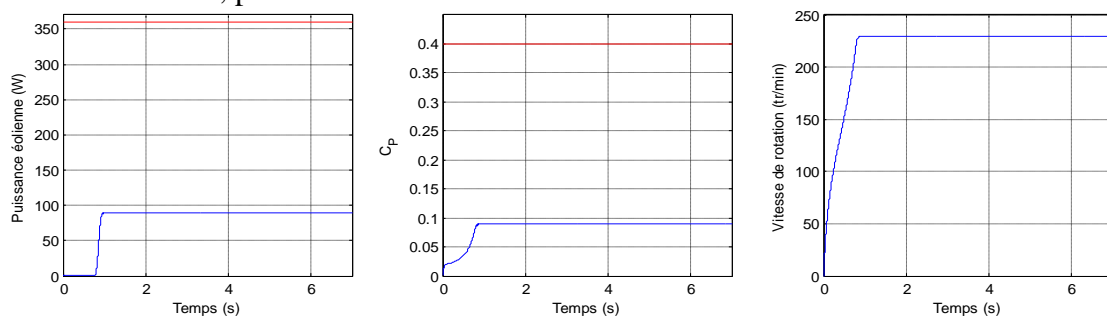


Figure IV.9. Comportement du système éolien sans MPPT

Pour une vitesse du vent égale à 8 m/s , la puissance maximale qui peut être délivrée par notre chaîne de production éolienne est 360 W . Cette puissance n'a pas été atteinte en branchant la génératrice et le pont de diode directement sur le bus continu. Ça se voit aussi à travers le coefficient de puissance C_p qui doit atteindre sa valeur maximale 0.4 .

IV.3.2. Fonctionnement du système éolien sous des conditions constantes

Dans cette section nous figurons les différentes variables du système éolien fonctionnant sous des conditions constantes à une vitesse de vent égale à 8 m/s .

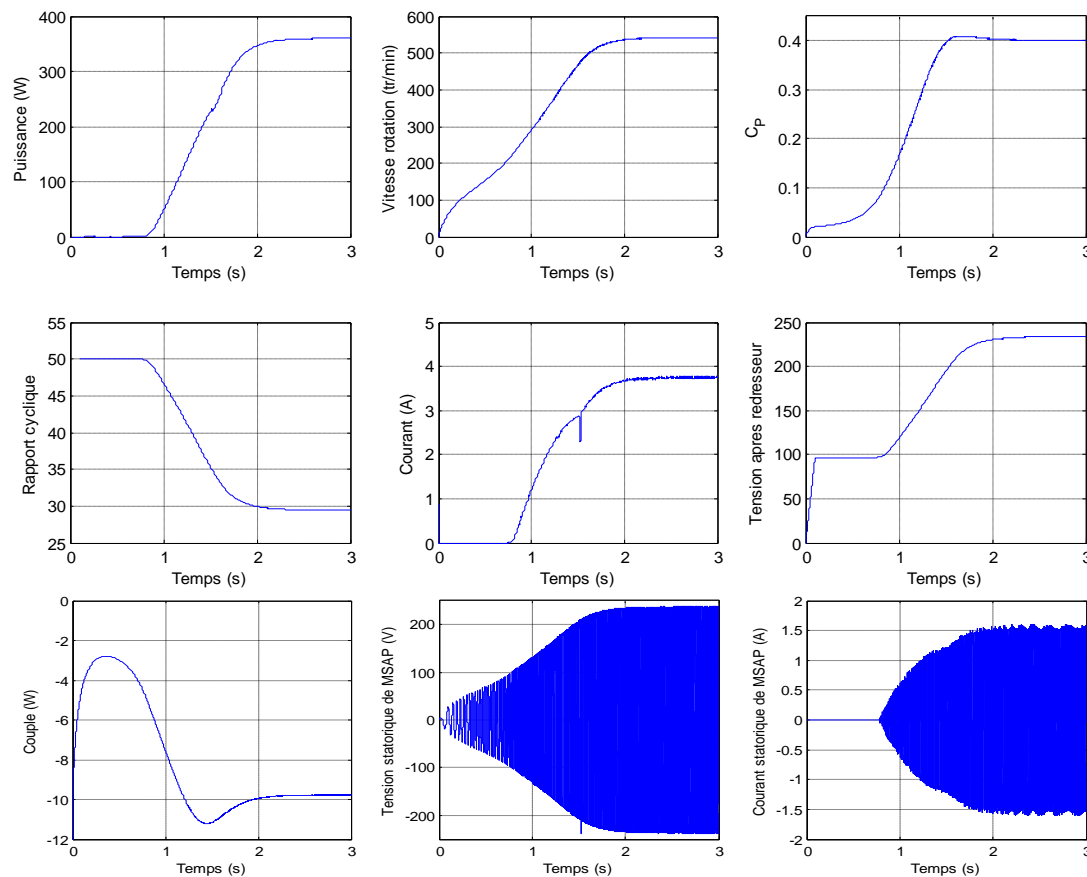


Figure IV.10. Réponse du système éolien à une vitesse du vent de 8 m/s .

La puissance délivrée par le générateur éolien a atteint son maximum au bout de 2 s , ça ce voit à travers la figure illustrant la puissance, et se vérifie à travers le coefficient de puissance C_p . Ce dernier atteint sa valeur maximale $C_p = 0.4$ quand la puissance atteint son maximum aussi.

IV.3.3. Fonctionnement sous des variations de la vitesse du vent

Pour tester l'efficacité de la stratégie de commande permettant à l'éolienne de poursuivre le point de puissance maximale, un test a été fait sous un profil du vent à vitesse variable. Le système est soumis à une vitesse du vent égale à 5 m/s jusqu'à $t = 4$ où elle augmente pour atteindre 9 m/s . Les résultats obtenus son présentés dans la figure suivante.

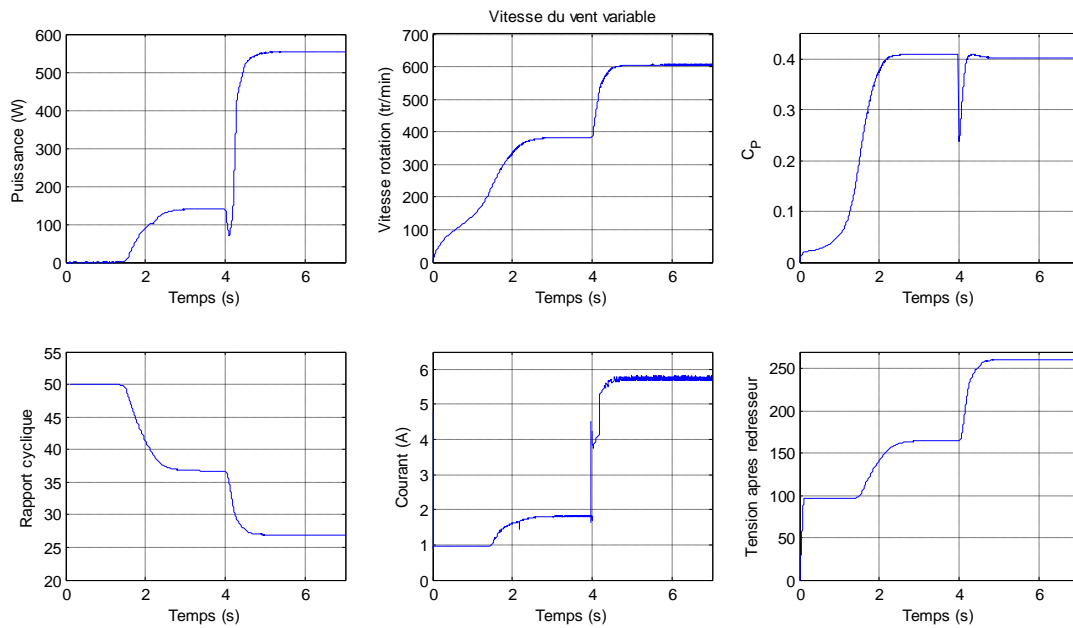


Figure IV.11. Comportement de la chaine de production éolienne face à une variation brusque de vitesse du vent.

Dans la figure suivante le comportement de la chaine de production éolienne est illustré face à une variation lente de la vitesse du vent. La variation introduite est de 8 m/s jusqu'à 6 m/s pendant 3 secondes à partir $t = 3$ s.

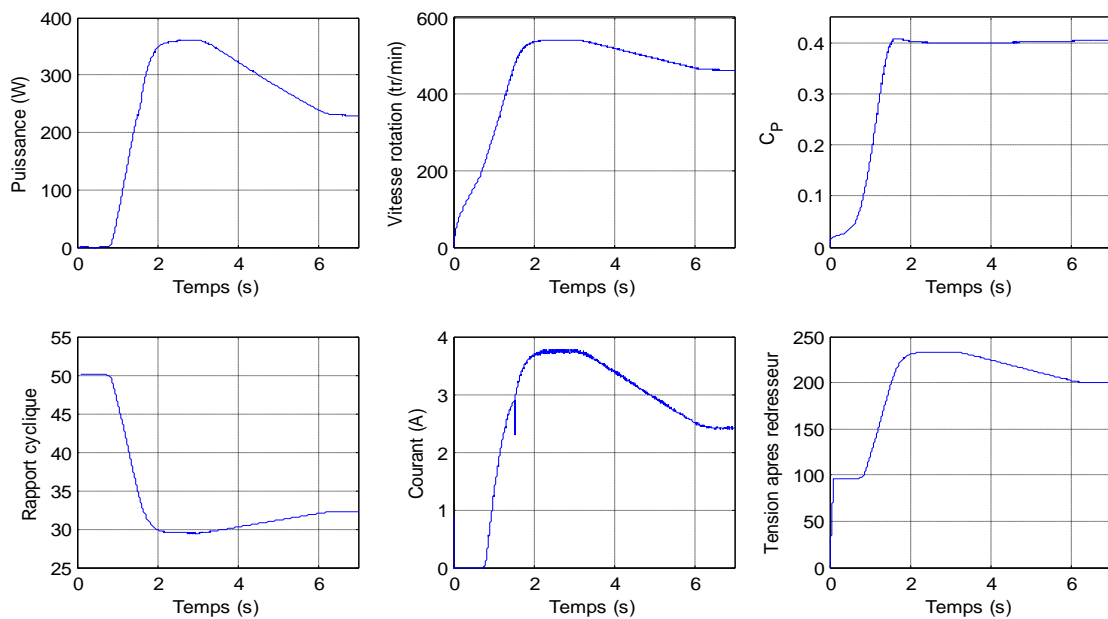


Figure IV.12. Comportement de la chaine de production éolienne face à une variation lente de vitesse du vent.

IV.3.4. Fonctionnement sous des variations de la tension de bus continu

Pour tester la robustesse du système envers les variations de la tension du bus continu, des simulations sous différentes variations de cette tension ont été faites. Dans la première, la tension de bus continu chute brutalement de **96V** à **80V**. Et dans la deuxième, le système est simulé sous une variation lente de la tension de bus continu de **96V** à **80V** sur **3s** à partir de $t = 3s$. On remarque que le système rejette ces perturbations et poursuit la puissance éolienne maximale.

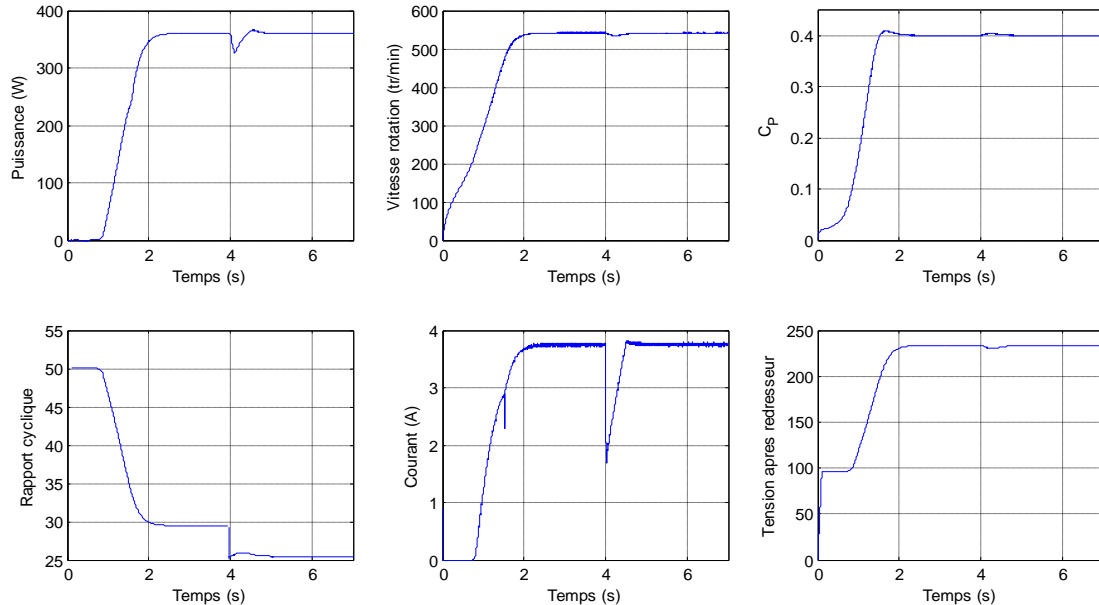


Figure IV.13. Comportement de la chaîne éolienne face à une variation brusque de la tension de bus continu à $t = 3s$.

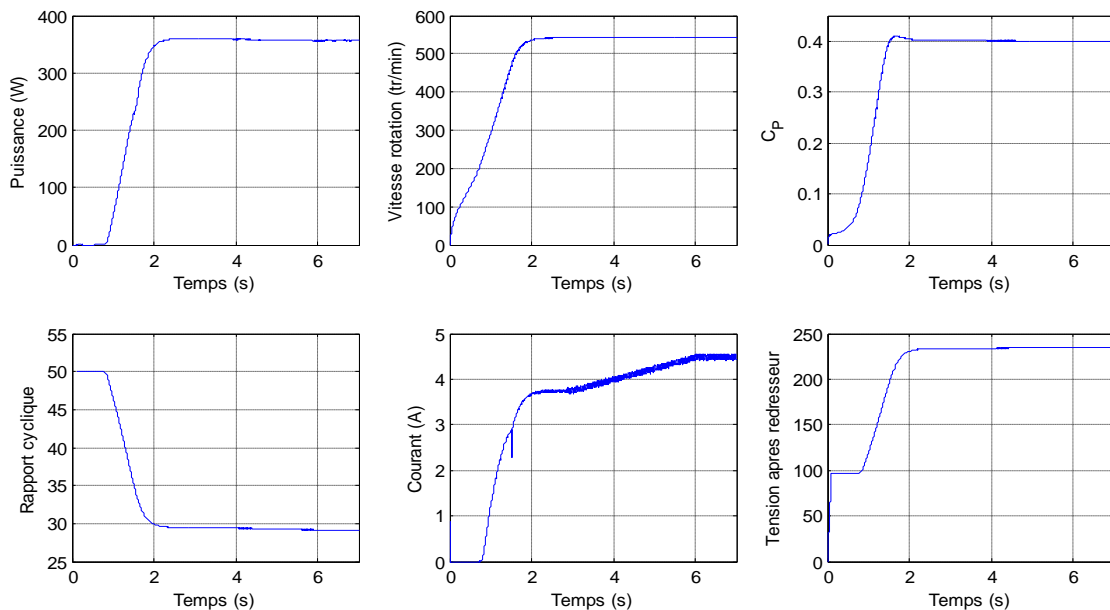


Figure IV.14. Comportement de la chaîne éolienne face à une variation lente de la tension de bus continu de $t = 3s$ à $t = 6s$.

IV.4. Simulation de bus continu

Comme on a vu précédemment, le nombre des batteries a été choisi pour avoir une tension nominale égale à 96 V. Suivant ce choix, la tension de bus continu doit être maintenue à cette tension ; C'est la fonction du régulateur flou. Il doit la stabilisée, malgré les chutes de tension soudaines provoquées par les appels de courant des charges. Ces courants font chuter la tension de bus quand les sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne, ne peuvent pas les couvrir. A ce moment là, le régulateur doit connecter les batteries pour aider à satisfaire la charge, toute en stabilisant la tension de bus, même après la demande du courant.

La connexion entre les batteries et le bus continu se fait à travers le hacheur réversible en courant commandé par le régulateur flou ; avec une période de commutation de $T_{DC} = 0.05s$.

Le maximum de courant de charge présenté dans la figure de simulation suivante est 15 A. Ce qui correspond à une charge de 1440 W de puissance. C'est le cas où tout les charges habituelles de la maison sont branchées avec d'autres charges de 440 W. Tout en supposant que les énergies renouvelables ne délivrent aucune puissance.

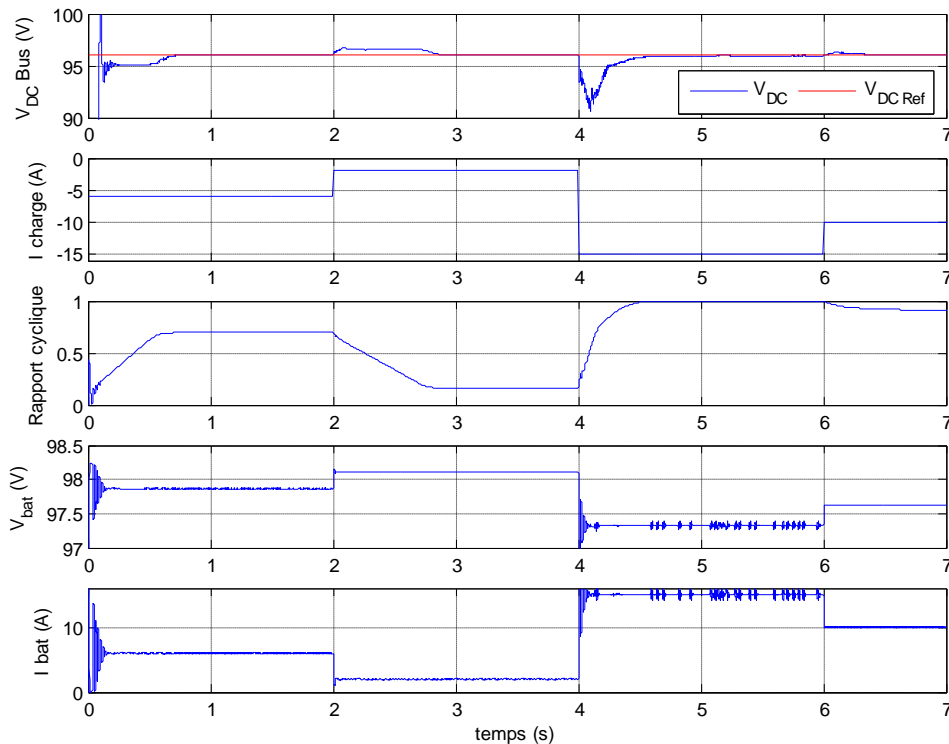


Figure IV.16. Comportement de la tension du bus continu face à des variations brusques de courant de charge.

En force le courant de charge à suivre une rampe négative pour voir si le régulateur flou assure comme même la tension de bus continu fixe à 96V. Le résultat est montré de la figure suivante et il est satisfaisant.

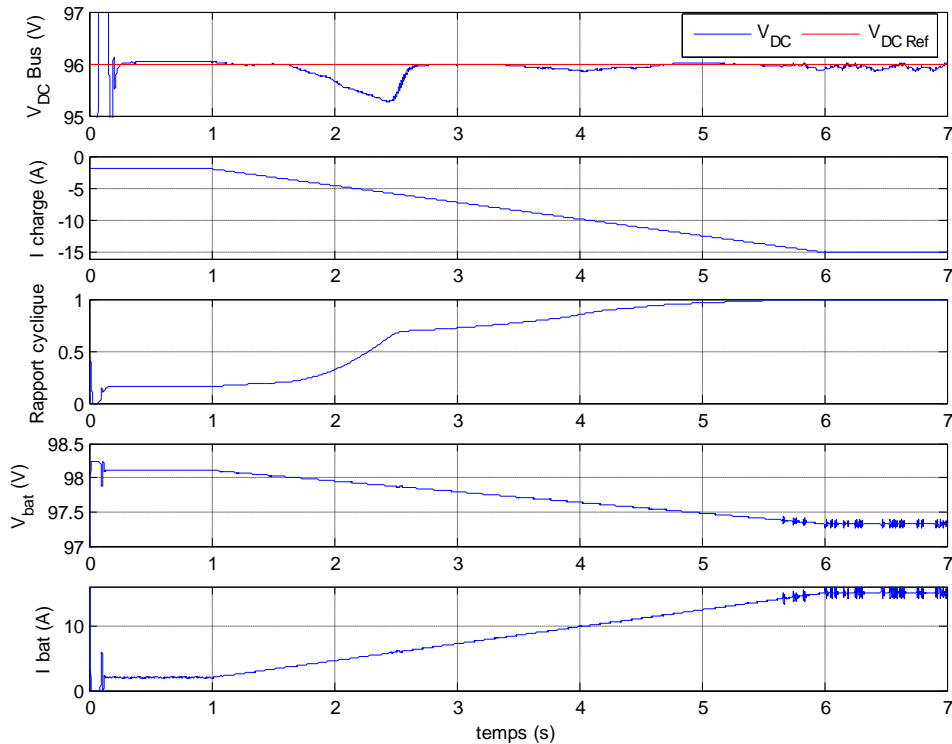


Figure IV.17. Comportement de la tension du bus continu face à une variation lente de courant de charge.

IV.5. Simulation du système thermique

Dans cette section nous allons voir les deux sous système thermique dans la maison à énergie positive proposée. Le premier s’agit du processus de chauffage d’eau à travers les collecteurs plat. Dans le second sous-système, on exploite l’eau chaude produite par le premier sous système pour chauffer l’atmosphère d’une pièce de la maison.

IV.5.1. Système de production d’eau chaude sanitaire

On a vu dans le paragraphe (II.7) les modèles analytiques des différents composants du système de chauffage d’eau (le collecteur plat, le réservoir de stockage et l’échangeur de chaleur). Dans ce qui va suit nous allons illustrer les simulations de ce sous-système complet.

IV.5.1.1. système en boucle ouverte

Commençant par le système sans commande sur la pompe, c.à.d. le système de production d’eau chaude est en boucle ouverte, donc la température de l’eau ne va pas être contrôlée.

La simulation est supposée faite sur une journée de 6h du matin jusqu’à 18h, pour voir la disponibilité par jour d’eau chaude dans la maison. Pour les profils de l’ensoleillement et de la température représentés dans la figure (IV.18) (le même utilisé dans l’exemple de la production photovoltaïque sur une journée), la température de l’eau sanitaire évolue de la façon illustrée dans la figure (IV.19). On a

figuré aussi les températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du collecteur thermique.

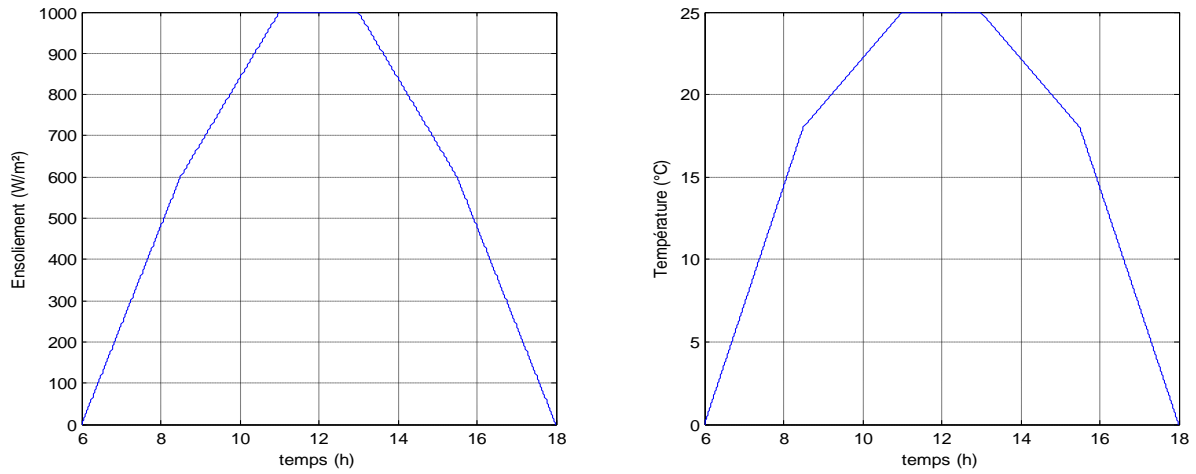


Figure IV.18. Profil de l'ensoleillement à gauche et de la température sur une journée.

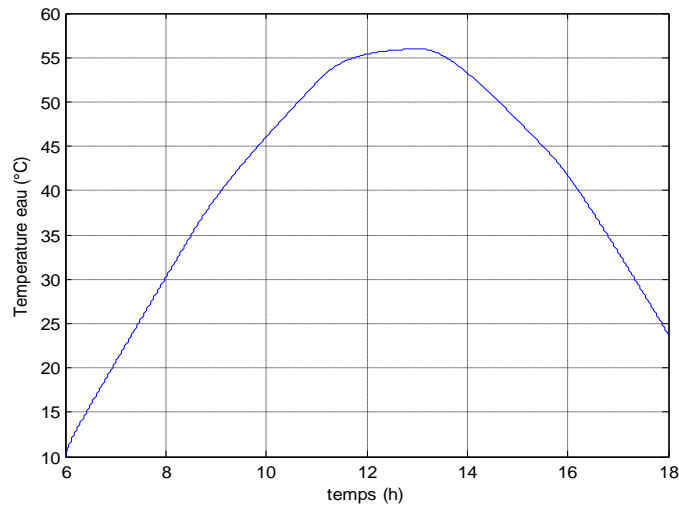


Figure IV.19. Température d'eau chaude sanitaire (système en boucle ouverte)

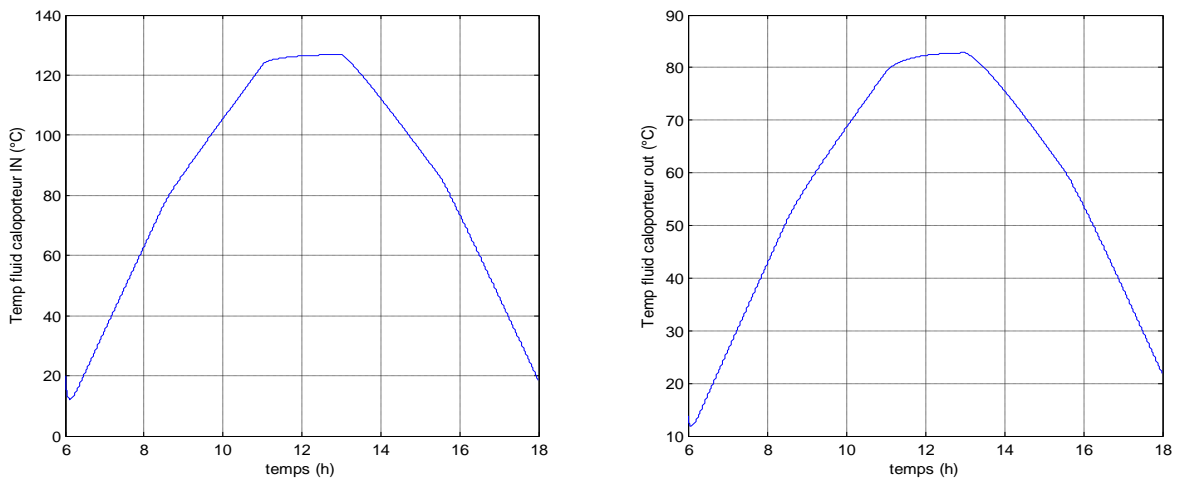


Figure IV.20. Température du fluide caloporteur à la sortie (à gauche) et à l'entrée (à droite) du collecteur plat.

IV.5.1.2. Système en boucle fermée

Pour les mêmes profils d'ensoleillement et de la température, on va effectuer des simulations du système en commandant le transfert de chaleur entre le collecteur et l'eau par la pompe. Cette dernière va être commandée sur une période de 120 s, avec un rapport cyclique donnée par le régulateur flou.

Dans la première simulation, on va fixer la température désirée de l'eau à 35 °C. Les résultats sont les suivants, sachant que la température de l'eau qui alimente le réservoir du stockage est fixée à 10 °C.

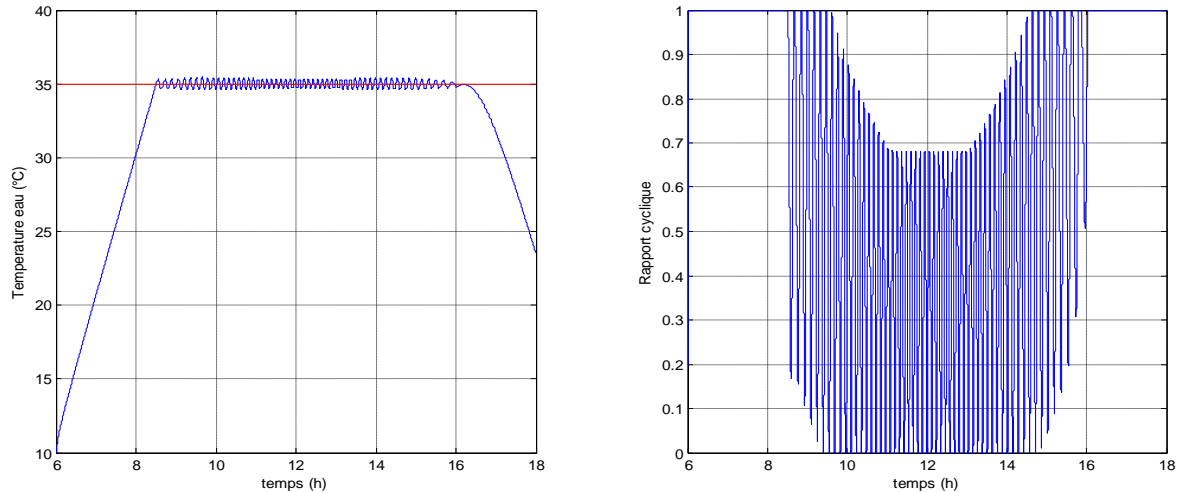


Figure IV.21. (a) Température d'eau sanitaire (b) rapport cyclique

On fait varier la consigne pour voir si le système suit la température désirée

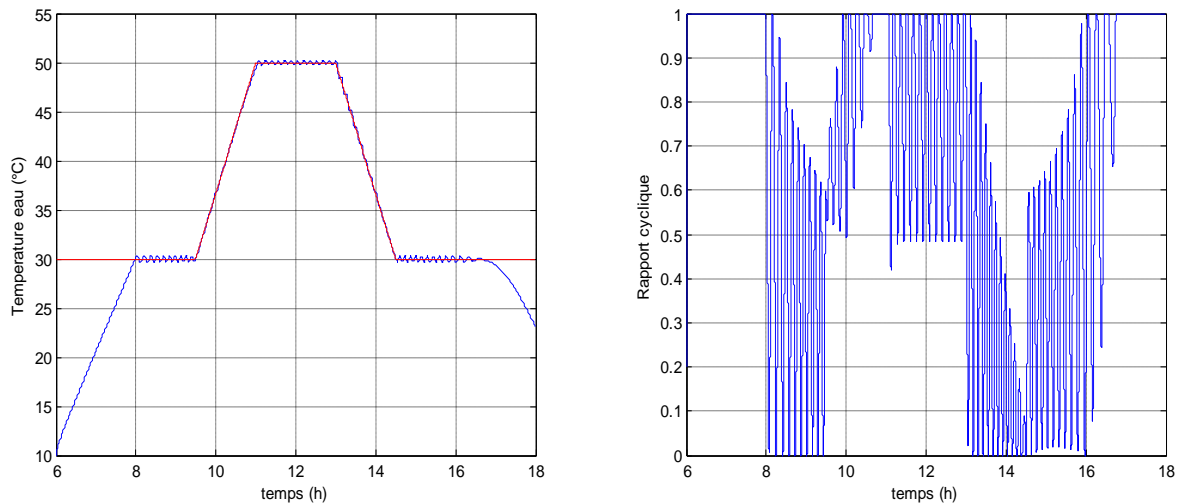


Figure IV.22. Variation de la température d'eau chaude produite

IV.5.2. Simulation du chauffage de la chambre

Dans ce que va suivre, on simule le comportement de la température ambiante de la chambre qu'on veut chauffer. En faisant circuler l'eau chauffée par l'installation thermique dans le chauffage auxiliaire installé dans la chambre, on augmente sa température ambiante. Cette augmentation, et par conséquent la température de la

chambre, peuvent être contrôlées en commandant la pompe responsable de la circulation d'eau chaude dans le chauffage auxiliaire.

Dans les simulations suivantes, on veut augmenter la température ambiante de la chambre et la maintenir à 25°C . Ces simulations sont effectuées pour les mêmes profils de l'ensoleillement et de la température utilisés dans les simulations du système de production d'eau chaude sanitaire.

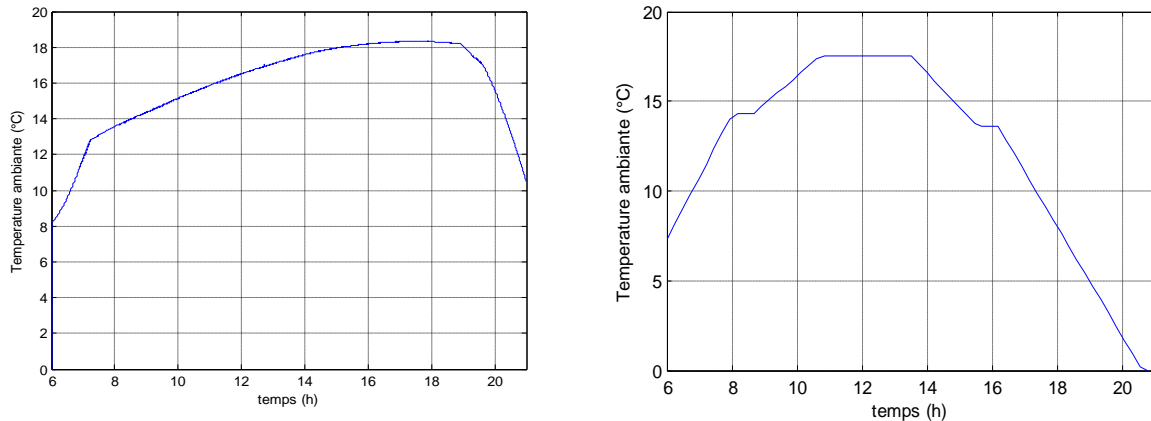


Figure IV.23. Les températures ambiantes (a) de la chambre et (b) de l'extérieur.

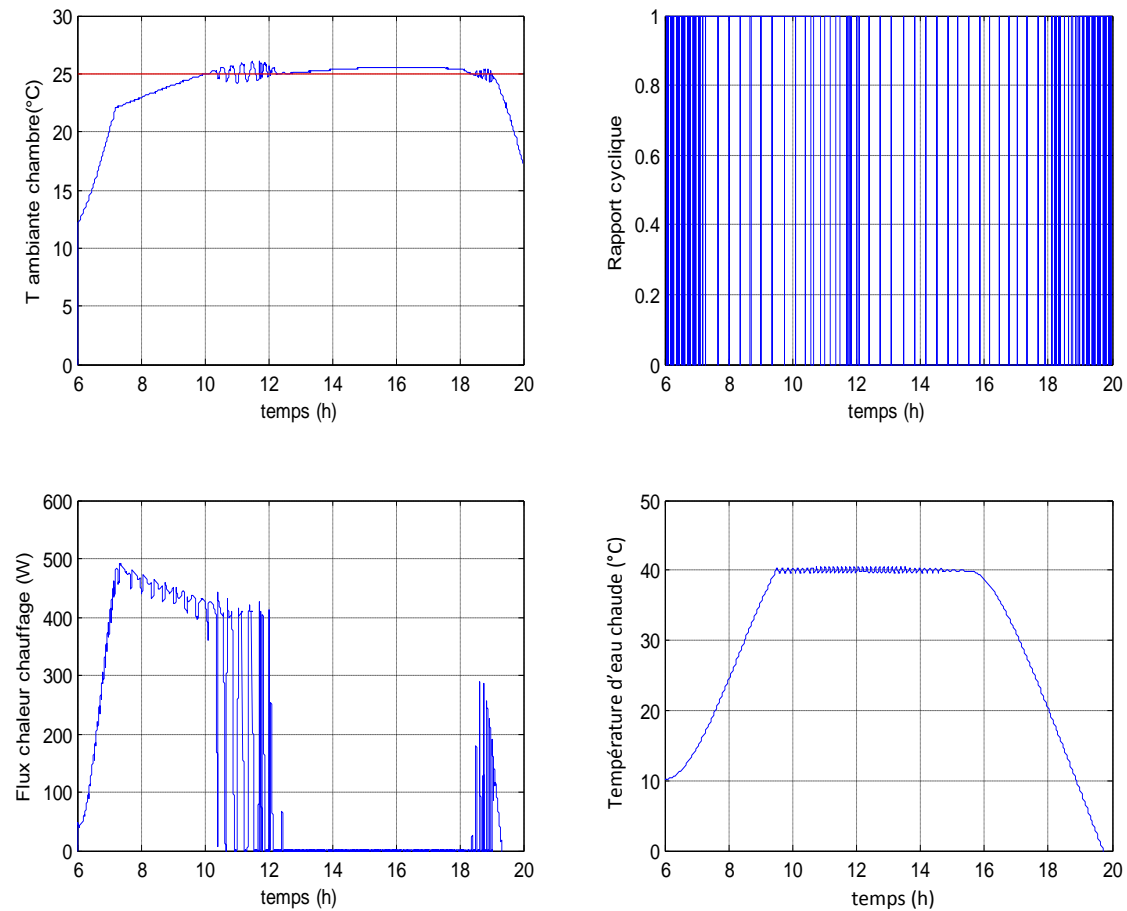


Figure IV.24. Comportement de la température ambiante de la chambre, rapport cyclique, le flux chaleur généré par le chauffage auxiliaire et la température d'eau chaude sanitaire.

IV.6. Simulation de la tension de sortie de l'onduleur

Dans cette section, des simulations de la tension de sortie de l'onduleur ont été effectuées. La tension du bus continu de l'onduleur est de $96V$. L'onduleur est commandé pour délivrer une tension sinusoïdale de $76.8V$ d'amplitude et de 50 Hz de fréquence, ce qui nous mène à asservir la tension de sortie de filtre à suivre une tension sinusoïdale de $133V$.

Les différentes commandes synthétisées précédemment dans le paragraphe (III.4.2) vont être testé avec des testes de robustesses. Le premier est le test par rapport aux variations de la charge, dont la charge est variée de 90% . Le deuxième test est le test par rapport à la variation de la tension du bus continu, elle est supposée chuter de $96V$ à $80V$ à $t = 0.03s$. Dans le dernier test de robustesse, le réseau est supposé absorber $2A$ du système.

IV.6. 1. Mode de glissement avec surface de Stolone

En appliquant la commande calculée dans l'équation (III.41) sur l'onduleur et le filtre décrit par l'équation (II.43). on obtient les résultats suivants.

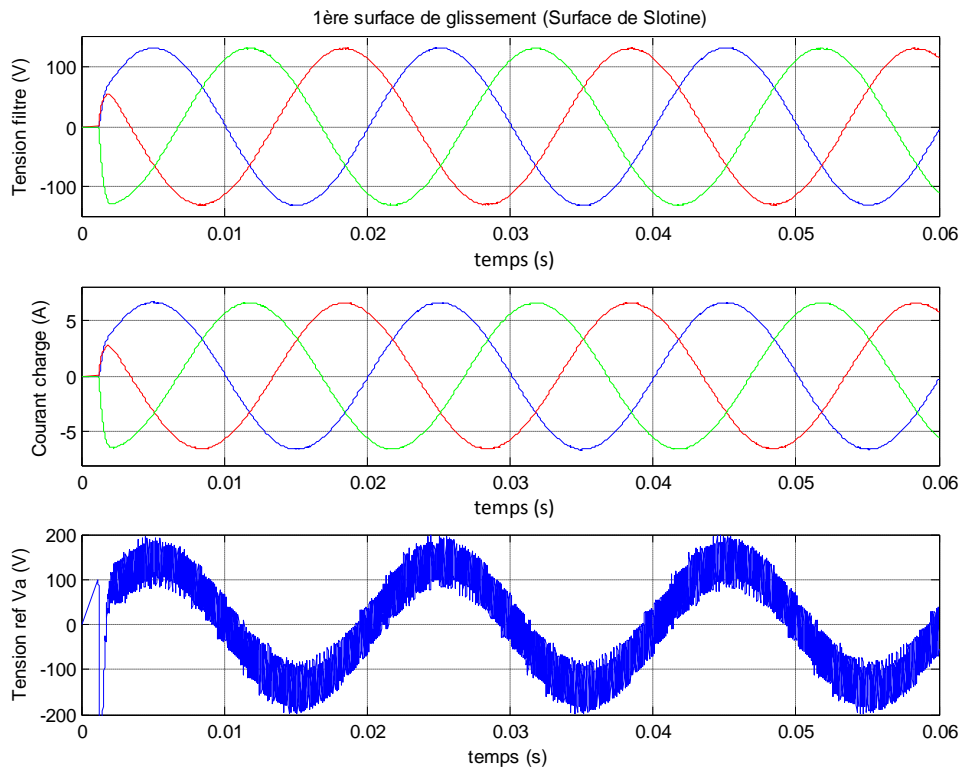


Figure IV.25. Tension sur le filtre, courant de charge et la tension de référence de commande $V_{a_{ref}}$.

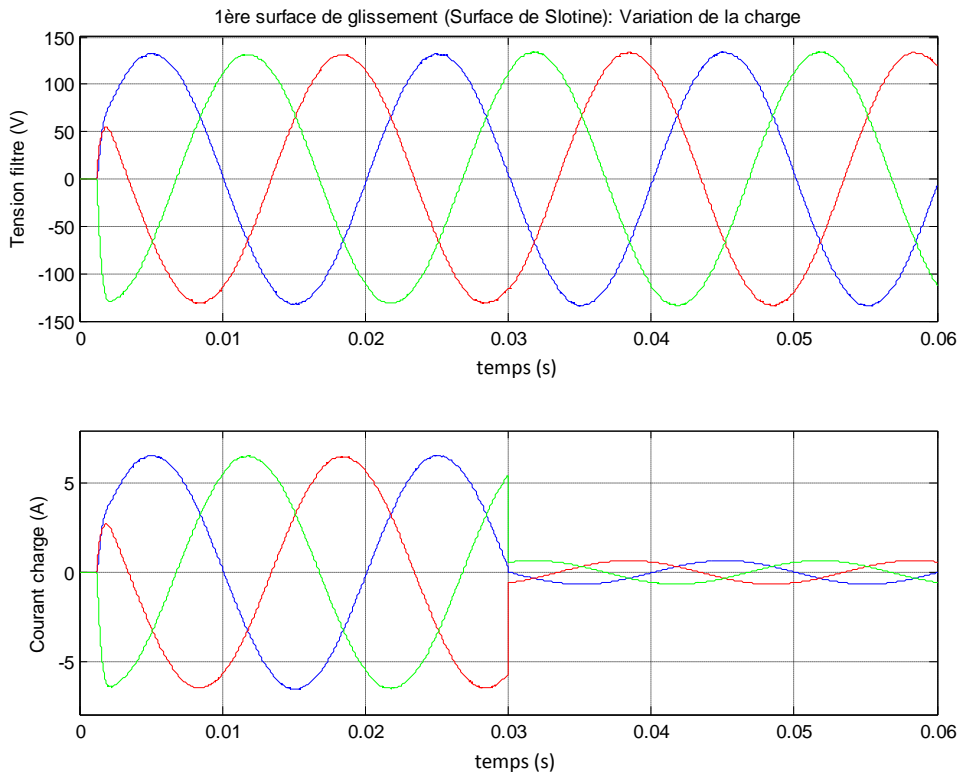


Figure IV.26. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face aux variations de charge à $t = 0.03$ s.

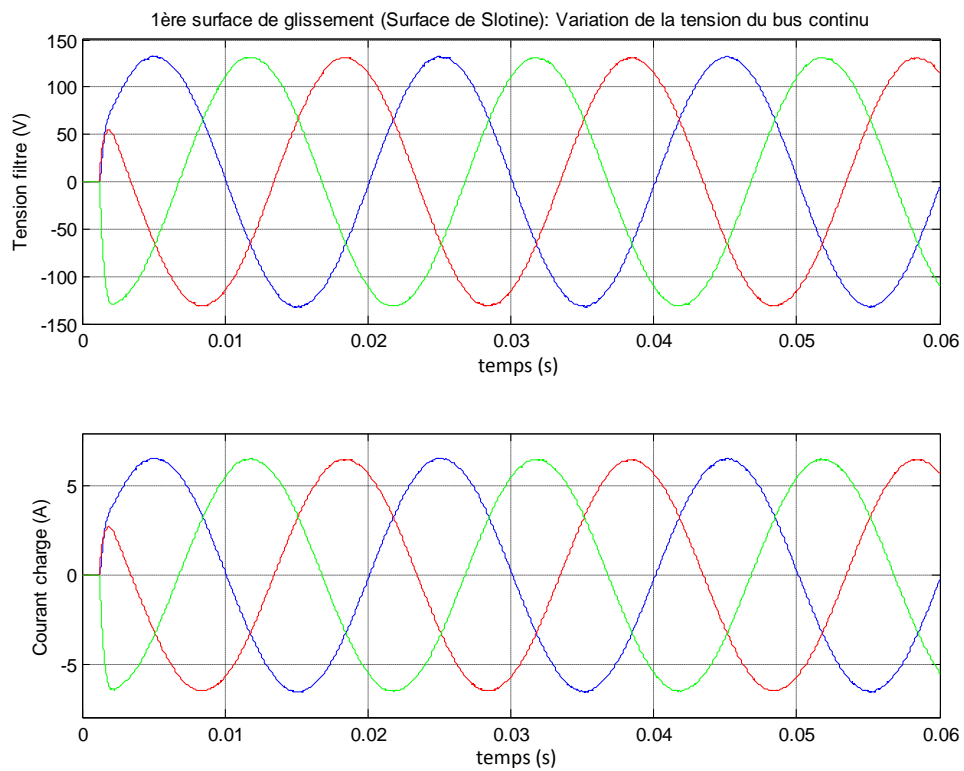


Figure IV.27. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face aux variations de la tension de bus continu à $t = 0.03$.

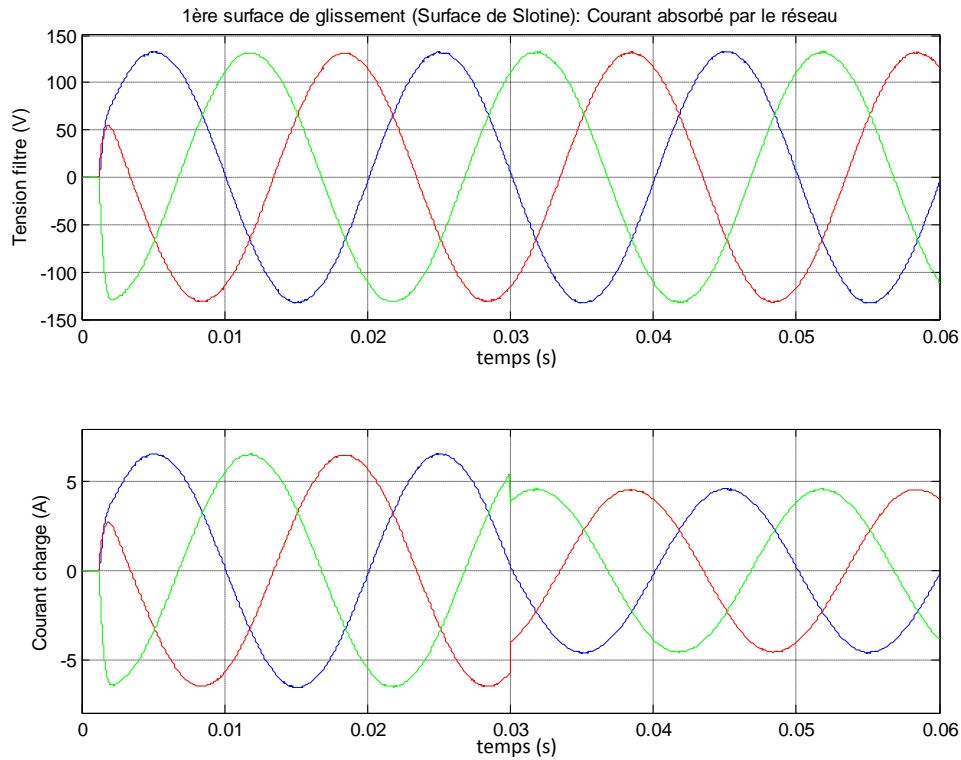


Figure IV.28. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face à une absorption du courant par le réseau à $t = 0.03$.

Les résultats de simulation de la commande par mode de glissement synthétisé par la surface de Slotine sont satisfaisants. L'étude de robustesse a montré que cette commande était assez robuste par rapport aux changements brusques de la charge, de la tension d'entrée et aux perturbations de la sortie.

IV.6. 2. Mode de glissement avec surface non linéaire

Dans cette section, la commande générée à partir de la surface non linéaire décrite par [Bou_03] va être testée sur l'onduleur, avec les tests de robustesses cités auparavant.

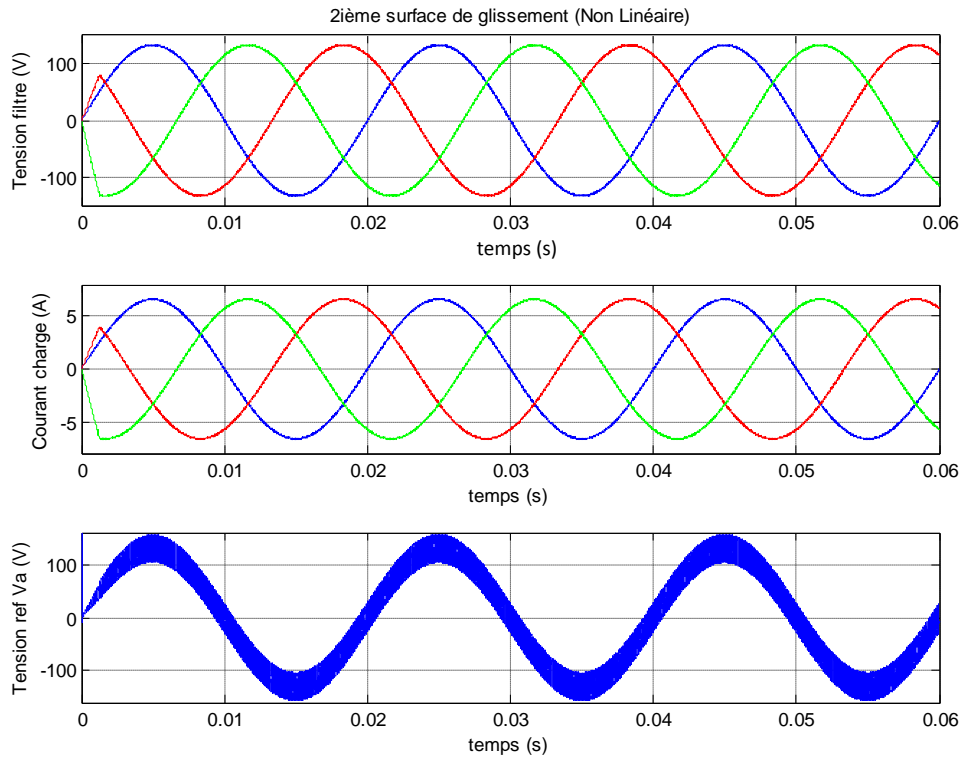


Figure IV.29. Tension sur le filtre, courant de charge et la tension de référence de commande $V_{a_{ref}}$.

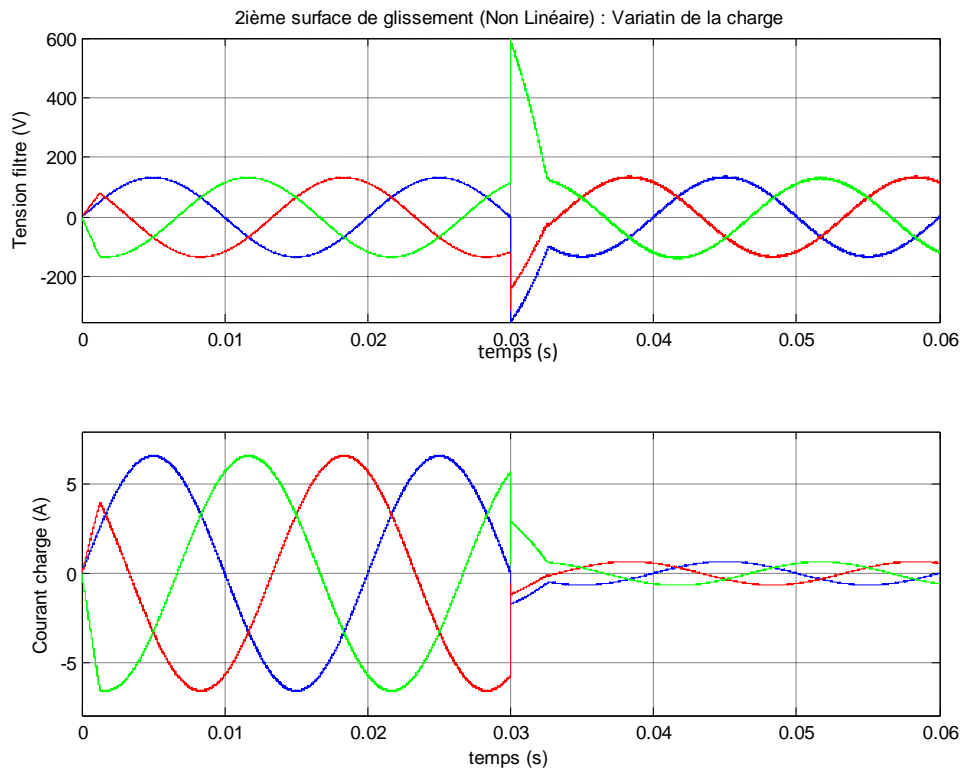


Figure IV.30. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face aux variations de charge à $t = 0.03s$.

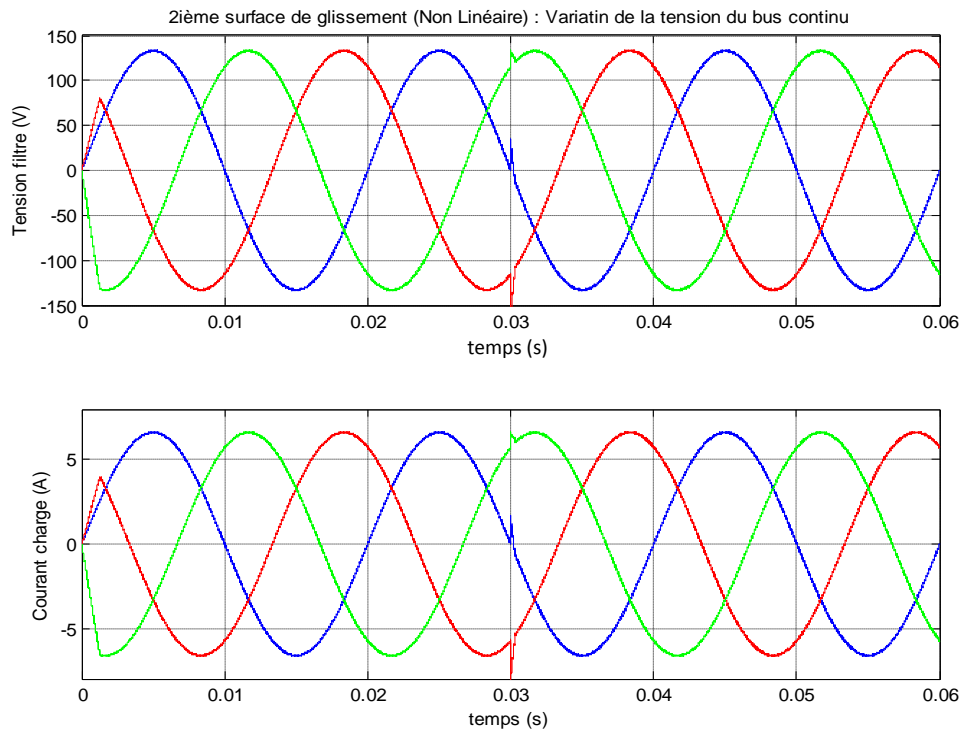


Figure IV.31. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face aux variations de la tension de bus continu à $t = 0.03$.

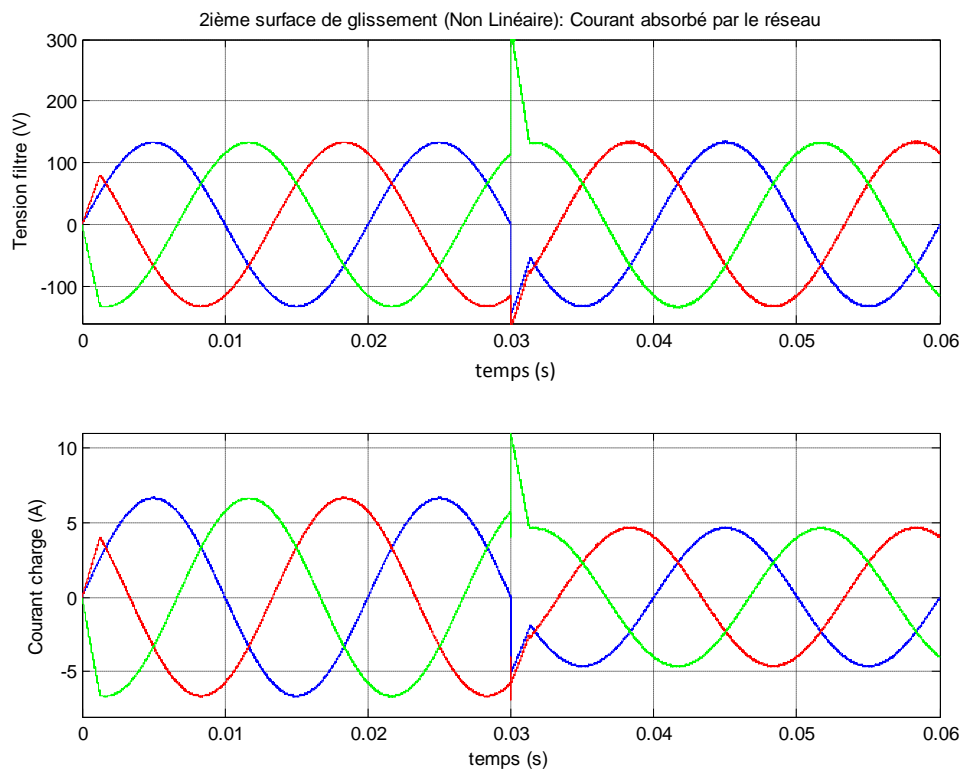


Figure IV.32. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face à une absorption du courant par le réseau à $t = 0.03$.

La commande a montré sa robustesse par rapport aux différentes variations testées. Seulement, on constate que les variations de la tension de bus continu et le courant absorbé par le réseau sont suivies d'un régime transitoire qui ne dépasse pas les 0.005 s.

IV.6. 3. Mode de glissement avec surface synthétisé par mode de glissement

La commande par mode de glissement qui va être testé sur l'onduleur est synthétisée par la méthode de backstepping dans le paragraphe (III.4.2.3). Elle est donnée par l'équation (III.58).

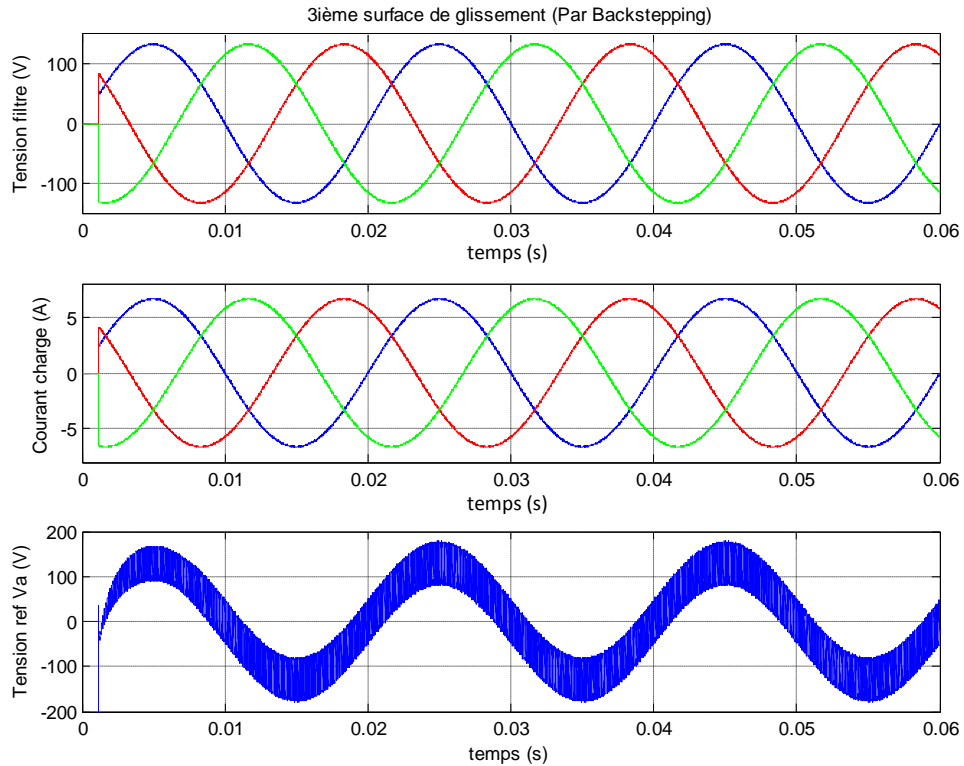


Figure IV.33. Tension sur le filtre, courant de charge et la tension de référence de commande $V_{a_{ref}}$.

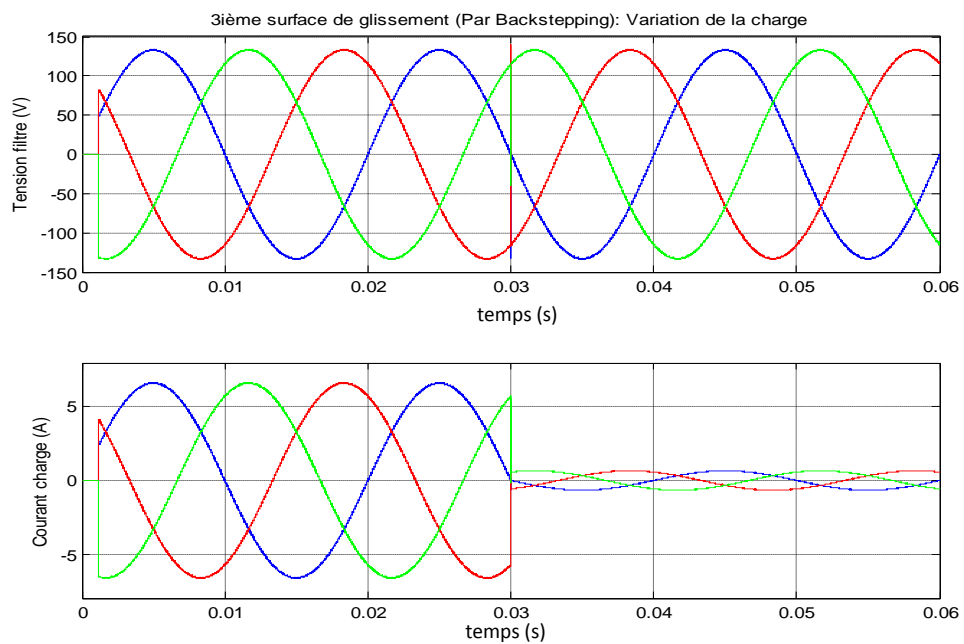


Figure IV.34. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face aux variations de charge à $t = 0.03s$.

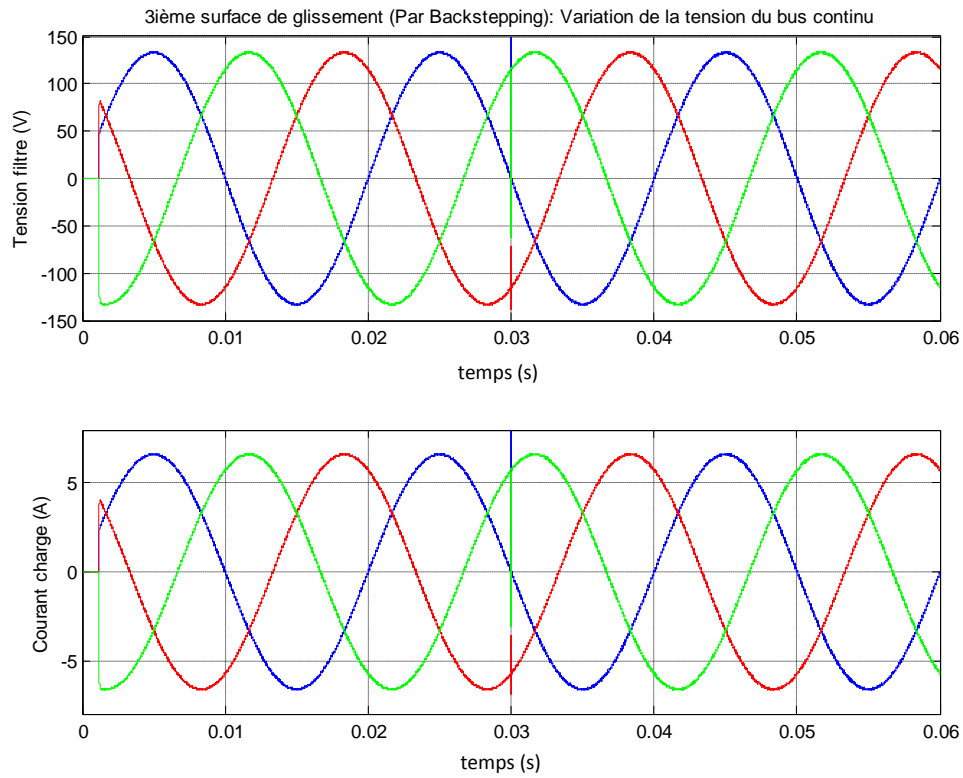


Figure IV.35. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face aux variations de la tension de bus continu à $t = 0.03$.

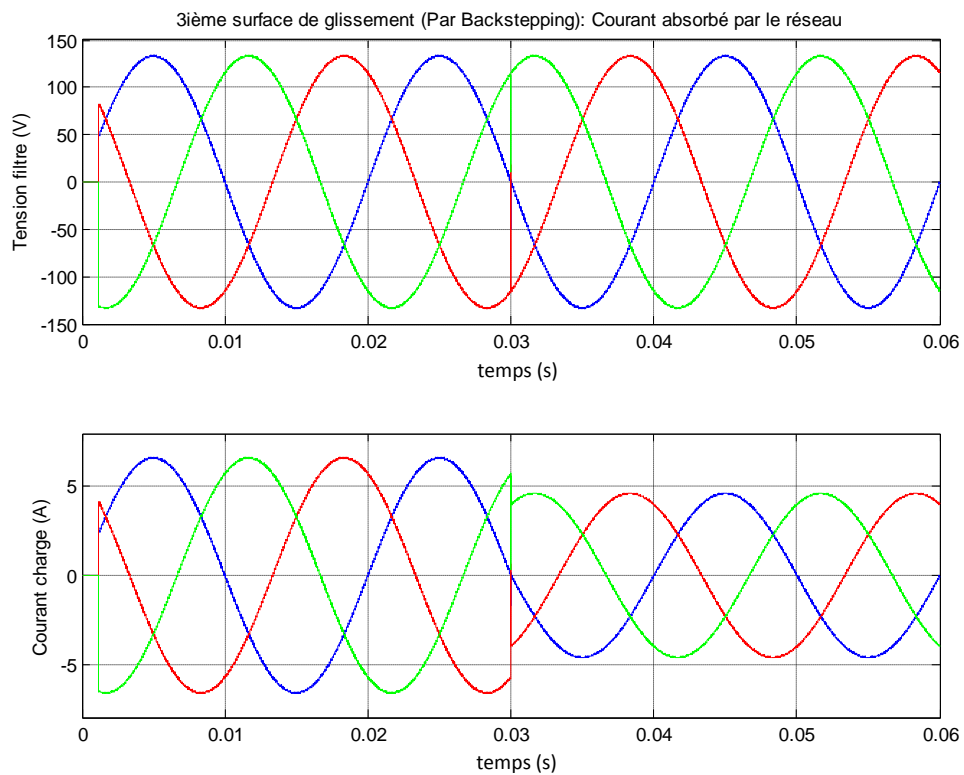


Figure IV.36. Evolution de la tension de filtre et de courant de charge face à une absorption du courant par le réseau à $t = 0.03$.

Les résultats de simulation de la commande par mode de glissement synthétisé par la méthode de backstepping sont satisfaisants. La commande a montré sa robustesse par rapport aux changements brusques de la charge, de la tension d'entrée et aux perturbations de la sortie.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a révélé, à travers les simulations, un bon comportement de système production d'énergie de la maison à énergie positive face aux changements climatiques et de charge. Le rôle de la commande hybride dans la poursuite du point de puissance maximale des sources d'énergies photovoltaïque et éolienne s'est montré très efficace pendant les variations de l'ensoleillement, de la température, de vitesse du vent et de la tension du bus continu. Cette dernière a pu être maintenue grâce au contrôleur flou qui agit sur le hacheur réversible en courant.

Les résultats de simulation ont montré comment le transfert d'énergie solaire thermique du collecteur vers l'eau domestique a été contrôlé, afin de régler sa température. Ainsi que le transfert de chaleur de l'eau chaude vers l'atmosphère d'une pièce de la maison.

Différentes commandes par mode de glissements, synthétisées dans le chapitre précédent, ont été testées sur l'onduleur afin de garantir une tension sinusoïdale pure au niveau du filtre malgré les différentes perturbations qui peut subir un tel système.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La conjoncture environnementale actuelle nous oblige à trouver des solutions alternatives et à changer des habitudes dont nous commençons à réaliser le danger. En effet, avec des ressources énergétiques qui s'amointrissent et une surconsommation toujours plus excessive, il est aujourd'hui nécessaire d'apporter des changements à nos habitations, responsables de 47% de la consommation énergétique mondiale et 25% des émissions de gaz à effet de serre.

L'étude réalisée dans ce mémoire s'est portée sur le concept de maison à énergie positive, une maison qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Dans ce contexte, une commande hybride est appliquée aux différents systèmes de production et gestion d'énergie renouvelable a été développée afin de commander et optimiser l'énergie produite.

Les différents concepts et définitions des maisons performantes, rencontrés dans la littérature, nous a permis d'avoir une idée claire sur les maisons à énergie positive. Pour une telle maison, la consommation globale d'énergie doit être plus faible que l'énergie qu'elle produit. Il est donc nécessaire d'associer aux techniques de réduction de consommation d'énergie, des moyens de production d'électricité et de chaleur, ainsi que des infrastructures adaptées pour stocker et transporter ces énergies.

L'énergie solaire photovoltaïque a été choisie pour faire partie de système de production d'énergie de notre système. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on a intercalé un hacheur élévateur-abaisseur entre le générateur et le bus continu. Ce dernier est commandé par un contrôleur flou, qui fait parti de la commande hybride, permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Notre étude s'est focalisée aussi sur l'éolien de petite puissance, secteur qui nécessite un fort degré d'optimisation de l'efficacité énergétique, notamment dans l'habitat. La machine synchrone à aimant permanent a été choisie comme génératrice car elle est la mieux adaptée pour les applications de petites puissances. Dans un souci de simplification et de minimisation des coûts, on a travaillé sur une structure simple basée sur un pont de diodes et un hacheur connecté au bus continu. Après une modélisation de toute la chaîne de conversion éolienne proposée, une recherche opérationnelle de point de puissance maximale (MPPT) a été proposée grâce à un algorithme basé sur la logique floue.

La modélisation des composants du système de stockage d'énergie a aussi été réalisée. Un modèle de batterie simplifiée relatif au système de stockage électrochimique plomb-acide, ainsi que celui du hacheur réversible en courant et celui de bus continu, ont été adoptés. Les sources d'énergie renouvelable et l'onduleur sont connectés sur le bus continu, il permet l'interfaçage entre eux. Donc la tension aux bornes du bus continu doit être fixée. Ceci est assuré à travers le hacheur réversible en courant commandé par le contrôleur flou.

On a vu après comment on économise l'énergie en exploitant l'énergie solaire par une installation thermique, qui permet le transfert de chaleur du soleil aux capteurs et jusqu'à l'eau. On a utilisé une pompe commandée par le contrôleur flou pour commander le transfert de chaleur, et par conséquent la température de l'eau stocker dans le réservoir. On croit souvent que les équipements solaires ne fonctionnent que lorsqu'il n'y a pas de nuages. Or, il fait jour même lorsqu'il y a des nuages, ce qui montre que les rayons transporteurs d'énergie du soleil sont bien présents, même quand celui-ci est caché. C'est ce qui explique que les systèmes solaires fonctionnent aussi dans le nord de l'Europe.

L'eau chaude peut être utilisée pour les sanitaires, pour amener de l'eau chaude vers le lave-linge, ou encore chauffer la maison. Dans ce contexte, on a modélisé une pièce de la maison qu'on veut la chauffé, ainsi que le chauffage auxiliaire. On a essayé de contrôler l'augmentation de la température ambiante de la chambre par le même contrôleur flou, en actionnant la pompe qui fait circuler l'eau chaude dans le chauffage auxiliaire.

Comme précisé précédemment, un des objectifs de la maison à énergie positive a été de générer une énergie électrique de qualité. Un onduleur triphasé a été modélisé avec un filtre LC pour lisser la puissance convertie. Des lois de commande robustes sont synthétisées pour ce convertisseur. Il s'agit de la technique de commande par mode de glissement, avec laquelle on a synthétisé trois commandes différentes pour trois surfaces de glissement. On a commencé par la surface de Slotine, puis une surface non linéaire. La dernière surface a été synthétisée par la méthode de backstepping.

Les différents modèles développés pour chaque constituant du système ont été ensuite interconnectés afin de contrôler le comportement dynamique du système complet. Les simulations ont permis ensuite de tester les performances de stratégies, de point de puissance maximale flou utilisées, pour différentes conditions météorologiques et de charges (tension de bus continu). Elles ont mis en évidence un comportement bien stable de bus continu, en présences des variations de sources et de charges. Les commandes par mode de glissement synthétisées pour les trois surfaces ont toutes montrés leur robustesse lors de la simulation, que ce soit par rapport aux variations de la charge ou par rapport à la variation de la tension de bus continu.

Les simulations ont montré aussi le profit d'énergie gagné en installant un collecteur thermique sur le toit de la maison. On a vu qu'une telle installation nous assure l'eau chaude sanitaire à une température désirée, qu'on peut la varier. Le comportement de la pièce chauffée par l'eau chaude produite a été simulé aussi Grâce à la modélisation thermique et le contrôleur flou.

Les résultats du travail présenté dans ce mémoire permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Tester le système d'énergie hybride en régime de déséquilibre
- Intégrer dans la commande hybride une commande qui permet un pilotage optimal de différentes unités de production.
- Dimensionnement optimal des composants de la maison à énergie positive.
- Utilisation des capteurs solaires hybride photovoltaïque-thermique pour accroître le rendement, en réduisant la température des jonctions des cellules photovoltaïques par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide.
- Tester les performances dynamiques de la commande hybride sur un système d'énergie d'une maison et voir le résultat du bilan énergétique

Bibliographie

[Ach_99] N. Achaïbou, "Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque," *Revue des Energies Renouvelables : Valorisation* Tome 1, Décembre 1999.

[Ant_97] Panos Antsaklis, Xenofon Koutsoukos, Janan Zaytoon, "On hybrid control of complex systems: a survey," Technical Report of the ISIS Group at the University of Notre Dame, December 1997.

[Ant_98] P. J. Antsakli, A. Nerode. "Hybrid control systems: An introductory discussion to the special issue." *IEEE Trans. Automatic Control*, pp. 457-460, April 1998. Special issue on hybrid systems.

[Ant_03] Antonio Luque, Steven Hegedus, "*Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*," John Wiley & Sons Ltd, England, 2003. pp 1079.

[Arm_09] Armando Bellini, Stefano Bifaretti, Vincenzo Iacovone, Cristina Cornaro, "Simplified Model of a Photovoltaic Module," *Applied Electronics*, Septembre 2009.

[Asc_03] T. Ackermann, L. Söder, "An overview of wind energy-status 2002," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Science, 2003, pp. 67-128.

[Bau_00] P. Bauer, S. W. H. de Hann, M. E. C. Damen, J. T. G. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for Offshore Windfarms," *IEEE IAS Annual Meeting*, Rome, 2000.

[Ben_98] A. Benchaïb, F. Boudjema, A. Rachid, "A new sliding mode flux observer based on backstepping method for induction motor," *World Automation Congress*, Albuquerque, Alaska, USA, Mai 1998, pp. 801-806.

[Boe_68] A. F. Boehinger "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, AES-4, n°1, Janvier 1968. pp 102-111.

[Bor_98] P. Borne J. Rozinoer J.Y. Dieulot, L. Dubois, "*Introduction à la Commande Floue*," Technip, Paris, France, 1998.

[Bou_89] F. Boudjema, M. Boscardin, P. Bidan, J. C. Marpinard, M. Valentin, J. L. Abatut, "VSS Approach To A Full Bridge Buck Converter Used For AC Sine Voltage Generation", 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON'89, Philadelphia, USA, November 1989, pp. 82-88.

[Bou_91] F. Boudjema, "Commande par mode glissement : Application aux convertisseurs multicellulaires," *Thèse de Doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1991.

[Bou_98] F. Boudjema, A. Benchaïb, A. Rachid, "Backstepping approach for nonlinear sliding mode control of an induction motor," *Electromotion*, Volume 5, Number 1, January-March 1998, pp. 29-34.

- [**Bou_03**] D. Boukhetala, F. Boudjema, T. Madani, M. S. Boucherit, N. K. M'Sirdi, "A new decentralized variable structure control for robot manipulators," *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 28-40.
- [**Bou_09**] A. Boubakir, F. Boudjema, S. Labiod, "A Neuro-fuzzy-sliding Mode Controller Using Nonlinear Sliding Surface Applied to the Coupled Tanks System," *International Journal of Automation and Computing*, February 2009.
- [**Bra_98**] Michael S. Branicky, Vivek S. Borkar, Sanjoy K. Mitter, "A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 43, No. 1, JANUARY 1998.
- [**Buh_94**] H. Buhler, "*Réglage par logique floue*," Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1^{ère} édition, Lausanne, Suisse, 1994.
- [**Bul_86**] H. Bühler, "*Réglage par mode de glissement*," Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.
- [**Buz_98**] J. Buzas, I. Farkas, A. Biro, R. Németh, "Modelling and Simulation of a Solar Thermal System," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 48, 1998, pp.33-46.
- [**Buz_09**] Jaons Buzas, "Block oriented modeling of solar thermal systems," Thèse de Doctorat, Szent Istvan University, Hongrie, 2009.
- [**Cha_06**] Messaoud Chakir, "Commande Robuste Tolérante aux Défauts Application à la MSAP," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [**Cou_05**] Cours d'Electronique De Puissance, IUT Génie Electric et Informatique Industrielle GEII – 2ième année – Option Electrotechnique et électronique de puissance (EEP), 2004/2005.
- [**Cou_xx**] Cours Energie et convertisseurs d'énergie, Licence EEA, Université de Savoie.
- [**Dah_04**] Kamal Dahmane, "Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée par Convertisseurs Matriciels," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- [**Dal_06**] Dalia N. Hussein, M.A.H. El-Sayed, H.A. Attia, "Optimal Sizing and Siting of Distributed Generation," *The Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, El-Minia, Egypt, Décembre 2006.
- [**Dan_08**] Danish J. Nizami, Marilyn F. Lightstone, Stephen Harrison, Cynthia Cruickshank, "simulation of the interaction of a solar domestic hot water tank system with a compact plate heat exchanger," 3rd Canadian Solar Buildings Research Network Conference, Fredericton, Canada, Août 2008.
- [**Dat_03**] R. Datta and V. T. Ranganathan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 18, No. 1, pp 163-168, Mars 2003.
- [**Deb_09**] Debosmita Das, Reza Esmaili, Longya Xu, Dave Nichols, "An Optimal Design of a Grid Connected Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell System for

Distributed Energy Production,” 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society , Raleigh, North Carolina, Novembre 2005.

[Dew_09] Dewei Xu1, Zhenhan Luo, “A Novel AC-DC Converter for PMSG Variable Speed Wind Energy Conversion Systems,” 6th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, China, Mai 2009.

[Dou_09] Bendib Douadi, “Etude et réalisation d’une commande MLI on-line sur circuit FPGA,” Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.

[Duf_91] J.A. Duffie, W.A Beckman, “*Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd Edition,” John Wiley & Sons, New York, 1991.

[Esr_06] T. Efram, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Juin 2006. pp. 439-449.

[Ess_04] M. Essen, “Thermal Performance of a Solar Cooker Integrated Vacuum Tube Collector With Heat Pipes Containing Different Refrigerants,” *Solar Energy*, Vol. 76, 2004, pp.751-757.

[Enr_08] Enrico Fabrizio, “Modélisation des systèmes multi énergies dans les bâtiments,” Thèse de Doctorat, Institut National des sciences Appliquées de Lyon, France, 2008.

[Esp_01] J.R. Espinoza, "Inveters" In: M.H.Rashid, "*Power Electronic Handbook*", Academic Pressm, California, USA, 2001, pp 225-269.

[Fau_88] J.F Fauvarque, “L’électrochimie et ses application,” L’actualité chimique, Rhone Poulenc, Novembre 1988.

[Foc_98] H. Foch, F. Forest et T. Meynard, “Onduleurs de tension. Structures. Principes. Applications,” *Techniques de l’ingénieur*, vol. D31, N0 D3176, Novembre 1998.

[Fog_09] Guillaume FOGGIA, “Piloteage Optimal de Système Multi-sources pour le Batiment,” Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, France, 2009.

[Fra_08] François Ruelle, “Le standard « maison passive » en Belgique : potentialités et obstacles,” Master en Sciences et Gestion de l’Environnement, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2008.

[Gil_08] Gurjot S. Gill, Alan S. Fung, “Solar domestic hot water system analysis using TRNSYS,” 3rd Canadian Solar Buildings Research Network Conference, Fredericton, Canada, Août 2008.

[God_99] J. Godjevac “*Idées nettes sur la logique Floue*,” Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1ère édition, Lausanne, Suisse, 1999.

[Gou_82] D. Le Gouriere, “*Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations*,” édition Eyrolles, France, 1982.

[Gou_09] C. R. Gould, C. M. Bingham, D. A. Stone, P. Bentley, “New Battery Model and State-of-Health Determination Through Subspace Parameter Estimation and

State-Observer Techniques,” *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 8, October 2009.

[Hai_06] Haizea Gaztañaga Arantzamendi, “Etude de structures d’intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux microréseaux,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.

[Hao_09] Haoxiong Wang, Weiming Ma, Fei Xiao, Minliang Cheng, Yong Liu, “Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Generator of Directly Driven Wind Turbine,” *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Chengdu, China, Septembre 2009.

[Hau_00] E. Hau, “*Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*,” éditions Springer, 2000.

[Hex_09] He XU, Jing HUI, Dinghui WU, Wenxu YAN, “Implementation of MPPT for PMSG-Based Small-Scale Wind Turbine,” 4th *IEEE Industrial Electronics and Applications*, Xi’an, China, Mai 2009.

[His_08] Guan-Chyun Hsieh, Hung-Liang Chen, Yaohwa Chen, Chee-Ming Tsai, Shian-Shing Shyu, “Variable Frequency Controlled Incremental Conductance Derived MPPT Photovoltaic Stand-Along DC Bus System,” *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, Texas, Février 2008.

[Hud_99] G. Hudson, C. P. Underwood, “A simple building modeling procedure for MATLAB/Simulink,” *Proceedings of the 6th International Conference on Building Performance Simulation* Kyoto, Japan, September 1999. pp. 777-783.

[Hud_02] R. M. Hudson, T. Thorne, F. Mekanik, M. R. Behnke, S. Gonzalez, J. Ginn, “Implementation and testing of anti-islanding algorithms for IEEE 929-2000 compliance of single phase photovoltaic inverters,” *Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, Louisiana, May 2002.

[Jia_02] Jia Yaoqin, Yang Zhongqing, Cao Binggang, “A new Maximum Power Point Tracking Control Scheme for Wind Generation,” *International Conference on Power System Technology*, Kunming, China, Octobre 2002.

[Jos_05] A. Jossen, J. Garche, H. Doering, M. Goetz, W. Knaupp, L. Joerissen, “Hybrid systems with Lead-acid battery and proton-exchange membrane fuel cell,” *Journal of Power Sources*, Vol. 144, pp. 395-401, 2005.

[Jos_06] Joseph Virgone, Enrico Fabrizio, Yoann Raffanel, Eric Blanco, Gérard Thomas, “Commande des systèmes multi-énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique,” *Journée thématique SFT-IBPSA*, Chambéry, France, 2006

[Jun_04] J. W. Jung, M. Dai, A. Keyhani, “Optimal Control of Three-Phase PWM Inverter for UPS Systems,” *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004.

[Kar_03] Per Karlsson, Jörgen Svensson, “DC Bus Voltage Control for a Distributed Power System,” *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 18, No. 6, November 2003.

[Kaz_09] Kazmi Syed Muhammad Raza, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, “An Improved and Very Efficient MPPT Controller for PV Systems subjected to Rapidly Varying

Atmospheric Conditions and Partial Shading,” Australian Universities Power Engineering Conference, Adelaide, Australia, Septembre 2009.

[**Kha_08**] Muhammad Shahid Khan, “Supervisory hybrid control of a wind energy conversion and battery storage system,” Thèse de Doctorat, University of Toronto, Canada, 2008.

[**Kha&Ira_08**] M. Shahid Khan, M. Reza Iravani, “Hybrid Control of a Grid-Interactive Wind Energy Conversion System,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 23, No. 3, Septembre 2008.

[**Kim_97**] Y. Kim, H. Ha, “Design of Interface Circuits with Electrical Battery Models,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 1, Février 1997.

[**Knu_04**] S. Knudsen, S. Furbo, “Thermal stratification in vertical mantle heat-exchanger with application to solar domestic hot water systems,” *Applied Energy*, Vol. 78, 2004, pp. 257-272.

[**Lar_04**] Laroche Jacques, “*L'électronique de puissance, cours et exercices corrigés*,” Edition Dunod, Paris, France, 2004.

[**Li-S_08**] Li-Shiang Lai, Wen-Chieh Hou, Ya-Tsung Feng, Yu-An Chen, “Novel Grid-connected Photovoltaic Generation System,” The 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, Chine, Avril 2008.

[**Lib_07**] Wu Libo, Zhao Zhengming and Liu Jianzheng, “A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System With Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, No. 4, December 2007.

[**Lor_82**] F. Lorenz, G. Masy, “Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apporté par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments. Traitement par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps,” Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, janvier 1982.

[**Mar_09**] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 24, No. 5, Mai 2009.

[**Men_03**] N. Mendes, G. H. Oliveira, H. X. Araújo, L. S. Coelho, “A Matlab-based simulation tool for building thermal performance analysis,” 8th International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, Août 2003.

[**Mir_05**] Adam Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, avril 2005.

[**Moh_02**] M. Mohsen, A. Akash, “On integrated solar water heating system, Int. Comm Heat Mass Transfer,” Vol. 29, 2002, pp.135-140.

[**Mok_06**] F. Mokhtari, N.Ait Messaoudène, A.Hamid et M.Belhamel, “Etude du comportement thermique d'une maison munie d'un système de chauffage solaire,” *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, 2006, pp.363-370.

[**Mol_06**] M. G. Molina and P. E. Mercado, "A New Control Strategy of Variable Speed Wind Turbine Generator for Three-Phase Grid-Connected Applications," IEEE/PES Transmission & Distribution Conference, Bogota, LA, Août 2008.

[**Mul_02**] S. Muller, M. Deicke, R.W. De Doncker, "Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines," IEEE Industry Applications Magazine, May-June 2002, Pages: 26-33.

[**Nab_09**] Nabil Abouchabana, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2009.

[**Naz_08**] Nazila Kahina Hannachi-Belkadi, "Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie," Thèse de Doctorat, Université Paris Est, France, 2008.

[**Nez_06**] Lazhari Nezli, "Contribution à la commande par les techniques modernes des machines synchrones," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.

[**Ngu_08**] Nguyen Thanh Hai, Suk-Ho Jang, Hong-Geuk Park, and Dong-Choon Lee "Sensorless Control of PM Synchronous Generators for Micro Wind Turbines," 2nd IEEE International Conference on Power and Energy, Johor Baharu, Malaysia, Decembre 2008.

[**Nos_05**] Nosh K. Medora, Alexander Kusko, "Dynamic battery modeling of lead-acid batteries using manufacturers data," 27th International Telecommunication Conference, Berlin, Germany, Septembre 2005.

[**Nou_05**] A. Nourai, B.P. Martin, D.R. Fitchett, "Testing the Limits," IEEE Power & Energy magazine, Mars/Avril 2005.

[**Oli_07**] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, Abdel-Allah Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, Texas, Septembre 2007.

[**Pal_81**] W. Palz, "*L'électricité Solaire*," Dunod Unesco, Paris, France, 1981.

[**Pas_98**] K.M. Passino et S. Yurkovich, "*Fuzzy Control*," Addison Wesley Longman, Californie, USA, 1998.

[**Pip_04**] M. Pipattanasomporn, "A study of a remote area internet access with embedded power generation," Master of Science, Virginia Polytechnic Institute, 2004.

[**Qin_08**] Qingrong Zeng, Liuchen Chang, Riming Shao, "Fuzzy-Logic-Based Maximum Power Point Tracking Strategy for PMSG Variable-Speed Wind Turbine Generation Systems," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Niagara Falls, Mai 2008.

[**Rac_09**] Tri Desmana RACHMILDHA, "La commande hybride prédictive d'un convertisseur quatre bras," Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.

[Ras_01] Muhammad Haroon RASHID, “*Power Electronic Handbook*,” Academic press, California, USA, 2001, pp. 540-541.

[Rib_01] P.F. Ribeiro, B.K. Johnson, M.L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, “Energy Storage Systems for Advanced Power Applications,” *Proceedings of the IEEE*, Vol 89, No 2, Décembre 2001.

[Ric_97] A. Ricaud, “*Photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés*,” Presses polytechniques et universitaires romandes, 1ère édition, Lausanne, Suisse, 1997.

[Rog_05] Roger A. Messenger, Jerry Ventre, “*Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition*,” CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005. pp. 284-285.

[Roy_98] J. Royer T. Djiako E. Schiller et B. S. Sy, “*Le Pompage photovoltaïque*,” Manuel de cours, université d’Ottawa, Canada, 1998.

[Sam_08] Samir Hazra, Partha Sarathi Sensarma, “DC Bus Voltage Build up and Control in Stand-alone Wind Energy Conversion System Using Direct Vector Control of SCIM,” 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics, Orlando, Florida, Novembre 2008.

[Sch_06] John Schönberger, Richard Duke, Simon D. Round, “DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 5, October 2006.

[Sha_04] Mohammad Shahid Shaikh, “Optimal control of hybrid systems: Theory and algorithms,” Thèse de Doctorat, Mc Gill University, Montréal, Canada, 2004.

[Slo_91] J.J. Slotine, W. Li, “*Applied nonlinear control*,” Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1991.

[Ste_08] Stéphane THIERS, “Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive,” Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2008.

[Tou_05] Touafek Khaled, “Etude d’un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique,” Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.

[Tou_09] K. Touafek , M. Haddadi, A. Malek, “Experimental study on a new hybrid photovoltaic thermal collector,” *Applied solar energy*, Springer, Vol 43, N° 3, 2009, pp. 181-186.

[TRN_04] *TRNSYS 16 - Mathematical Reference*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, USA, 2004.

[Und_99] *Understanding buck-boost power stage in SMPS*, Application report, Texas Instruments, SLVA059, Mars 1999.

[Utk_77] V. I. Utkin, “Variable structure systems with sliding modes,” *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-22, 1977, pp. 212-222.

[Vec_05] Ionel Vechiu, “Modélisation et analyse de l’intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome,” Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.

[Vos_07] K. Voss, et M. Kramp, “Zero-energy/emission-buildings,” Definitions and building practices, Actes de la conférence Central Europe towards Sustainable Building (CESB 07), Prague, 2007, pp. 547-552.

[Wai_07] R.J. Wai, C.Y. Lin and Y.R. Chang, “Novel maximum-power-extraction algorithm for PMSG wind generation system,” IET Electronic Power Application, Vol. 1, No. 2, Mars 2007.

[WAL_97] J.F. Walker, N. Jenkins, “*Wind energy technology*,” John Wiley & Sons Ltd, England, 1997.

[Wan_08] Wang Yi-Bo, Wu Chun-Sheng, Liao Hua and Xu Hong-Hua, “Steady-State Model and Power Flow Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Power System,” IEEE international Conference on Industrial Technology, Chengdu, China, Avril 2008.

[Xue_04] Xuemei Zheng, Lin Li, Dianguo Xu and Jim Platts, “Sliding Mode MPPT Control of Variable Speed Wind Power System,” Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, Mars 2009.

[Yas_09] Yasmine Guyot, Arthur Giavitto, Axel Le Pennec, Briec Pey, David Nicolas, “Les bâtiments à bilan énergétique positif,” Rapport projet environnement, Ecole Nationale Supérieure Saint-Etienne, France, 2009.

[Yuf_08] Yufeng Lin, Jin Zhong, “Converter Controller Design Methods for Wind Turbine Systems in the DC Micro Grid,” IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, Juillet 2008.

[Zah_00] T. Zaharieva, “Commande a structure variable appliquée a un moteur synchrone,” Thèse pour l’obtention du Diplôme de Recherche, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, France, 2000.

[Zha_09] Qi Zhang, Xiangdong Sun, Yanru Zhong, Mikihiro Matsui, “A Novel Topology for Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Power Generation System,” IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, China, Mai 2009.

[Zhe_07] Zhenhong Guo and Liuchen Chang, “New Converter Topologies for Two-Phase Wind Turbine PMSG Generation System,” 22nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, Anaheim, California, Mars 2007.

[Zhe_10] G. Zheng, D. Boutat, J. P. Barbot, “On uniform controller design for linear switched systems,” Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, Elsevier, Vol. 4, Issue. 1. pp. 189-198, Février 2010.

Annexe

Paramètres du panneau solaire photovoltaïque

Type	UDTS50		P_{max}/module	52.66	W
I_{sc}	3.43	A	R_s	0.9	Ω
V_{oc}	21.28	V	S	10×10	cm^2
I_{mp}	3.16	A	α	0.00343	A/C°
V_{mp}	16.65	V	β	-0.05958	V/C°
P_{Total}	520	W	N_s	2	

Paramètres de la MSAP et de la turbine éolienne

Puissance nominale	600	W	Résistance statorique	1.137	Ω
Tension nominale	90	V	Inductance statorique	2.7	mH
Courant nominal	4.8	A	Flux efficace	0.15	Wb
Vitesse nominal	177	rpm	Coef de frottement	0.06	$\frac{N.m.s}{rad}$
Pairs de pôles	17		Inertie du rotor	0.1	$N.m$
Rayon de la turbine	1.5	m	λ optimale	8	

Paramètres du système de production d'eau chaude sanitaire

A_c	5.56	m^2	$V_c c$	4e-3	m^3
MU_0	0.64		A_{ex}	0.8	m^2
UL	4.65	$W/m^2 K$	U_{ex}	300	$w/m^2 K$
C_c	15797	J/K	V_s	0.25	m^3
ρ	1054	Kg/m^3	\dot{v}_c	72	l/hr

Valeurs des condensateurs et inductances des différents convertisseurs

Inductance de convertisseur Buck-Boost	5.6	mH
Condensateur de convertisseur Buck-Boost	5.6	μF
Inductance du hacheur réversible en courant	3	mH
Condensateur du bus continu	2200	μF
Inductance de filtre LC	0.6	mH
Condensateur de filtre LC	200	μF