

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

LABORATOIRE DE COMMANDE DES PROCESSUS

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT ET DE MASTER EN AUTOMATIQUE

THÈME :

COMMANDES INTELLIGENTES APPLIQUÉES AU
BÂTIMENT À ÉNERGIE POSITIVE

Président du jury :
Mr M. ILLOUL

Etudié par :
AITAMER Mohamed Walid
MANAA Abdelwahed

Examineur :
Mr O. STIHI

Rapporteur :
Pr D.BOUKHETALA
Pr F.BOUDJEMA

Juillet 2012

E.N.P- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger

الملخص: في هذه الأطروحة سعينا إلى زيادة مردود الطاقة في المباني الذكية ذات الطاقة الإيجابية. المباني التي تنتج أكثر مما تستهلك ، تم استعمال تقنية تتبع الطاقة القصوى لغرض تحسين و توفير الطاقة المولدة عن طريق الطاقة الشمسية و طاقة الرياح ، كما تم ربط هذان الأخيران إلى الشبكة الكهربائية عن طريق مموج باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة. وفي الأخير عرضنا نموذج لمبنى ذكي لتحديد أبعاد المولدات المستعملة .

الكلمات المفتاحية: مبنى ذو الطاقة الإيجابية ، مبنى ذكي، الطاقة الشمسية ، طاقة الرياح، تقنية تتبع الطاقة القصوى، المحولات الكهربائية.

Résumé : Dans ce travail on a cherché à optimiser l'énergie dans un bâtiment intelligent à énergie positive; un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme. On a présenté les principales techniques de mise au point de tels bâtiments en Algérie. Des commandes MPPT ont été introduites afin d'extraire le maximum de puissance des générateurs photovoltaïques et éoliens. Ces derniers sont connectés à un bus continu, ou un onduleur muni d'un filtre commandé par MLI assure la connexion au réseau du bâtiment. Pour finir, une modélisation du bâtiment intelligent a été faite afin de dimensionner les générateurs d'énergies renouvelables.

Mots clés : bâtiment à énergie positive, bâtiment intelligent, optimisation, photovoltaïque, éolien, convertisseurs d'électronique de puissance, MPPT, P&O, logique floue, réseau de neurones, bus continu, raccordement au réseau d'un Bâtiment à Energie Positive.

Abstract: In this work, we sought to optimize the energy in an energy plus smart building, a building that produces more energy than it consumes. We presented the main technical focus of such buildings in Algeria. MPPT controls were introduced to extract the maximum power from photovoltaic arrays and wind generators. The latter are connected to a DC bus, where an inverter provided with a filter controlled by PWM supports the connection of the building to the grid. Finally, a smart building modeling was done for the design of renewable energy generators.

Key words: positive energy building ,smart building, optimization, photovoltaic, wind energy, power converters, MPPT, P&Fuzzy logic, DC bus, grid connection of building .

REMERCIEMENTS

Nous remercions **DIEU** qui nous a remplis de foi et de force pour finir ce projet.

Nos parents qui nous ont beaucoup encouragés le long de ce projet.

Et à l'issu de nos études faites au sein de l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE nous voudrions rendre un hommage tout particulier à :

Nos promoteurs **MR F. BOUDJEMA ET MR D. BOUKHETALA** qui nous ont honoré en acceptant de nous encadrer.

Mme **N. AITAMER** qui nous a été d'une aide précieuse dans la mise au point de ce projet.

Tous les enseignants du département d'AUTOMATIQUE de l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE.

Tous les enseignants du département des Sciences Fondamentales de l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE.

Nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de nos études.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| I État de l'Art sur les Bâtiments à Énergie Positive. | 3 |
| I.1 Introduction | 4 |
| I.2 Concepts de bâtiments performants | 4 |
| I.2.1 Types de bâtiments performants | 4 |
| I.3 Définition du bâtiment à énergie positive | 6 |
| I.4 Sources d'énergies renouvelables | 7 |
| I.4.1 L'énergie solaire photovoltaïque | 7 |
| I.4.1.1 Composition d'un système photovoltaïque | 7 |
| I.4.1.2 Technologies de modules photovoltaïques | 8 |
| I.4.1.3 Types de systèmes photovoltaïques | 9 |
| I.4.1.4 Intégration de système photovoltaïque dans les bâtiments | 10 |
| I.4.2 L'énergie éolienne | 13 |
| I.4.2.1 Classement des Turbines Eoliennes | 14 |
| I.4.2.2 Générateurs | 17 |
| I.5 Potentiel algérien en énergies renouvelables | 19 |
| I.5.1 Potentiel solaire | 19 |
| I.5.2 Potentiel éolien | 20 |
| I.5.3 Energies géothermiques | 21 |
| I.6 Politique nationale concernant les énergies renouvelables | 21 |
| I.7 Environnement et Coût des Energies Renouvelables | 22 |
| II Modélisation des Composants du Bâtiment à Énergie Positive. | 25 |
| II.1 Modélisation de la chaîne photovoltaïque | 26 |
| II.1.1 Introduction | 26 |
| II.1.2 La cellule photovoltaïque | 27 |
| II.1.3 Modélisation du générateur photovoltaïque | 27 |
| II.2 Modélisation du système éolien basé sur une MADA | 30 |
| II.2.1 Description du système éolien | 30 |
| II.2.2 Modélisation du système éolien | 32 |
| II.2.2.1 Modèle de la turbine éolienne | 32 |

| | | |
|----------|---|----|
| II.2.2.2 | Fonctionnement et modélisation de la MADA | 35 |
| II.3 | Modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau | 38 |
| II.3.1 | Modélisation du bus continu | 39 |
| II.3.2 | Modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park | 39 |
| II.4 | Modélisation des composants d'électronique de puissance | 40 |
| II.4.1 | Modélisation du hacheur | 40 |
| II.4.2 | Modélisation de l'onduleur | 41 |
| II.4.3 | Modélisation du redresseur | 41 |

III Commande des Générateurs d'Énergie Renouvelables **44**

| | | |
|-----------|---|----|
| III.1 | Commande et optimisation du générateur photovoltaïque | 45 |
| III.1.1 | MPPT par l'algorithme perturb and Observe | 47 |
| III.1.1.1 | Principe | 47 |
| III.1.2 | MPPT par logique floue | 48 |
| III.1.2.1 | La logique floue | 48 |
| III.1.2.2 | Terminologie de la logique floue | 49 |
| III.1.2.3 | Structure de base d'un contrôleur flou | 50 |
| III.1.2.4 | Application de la logique floue pour la recherche du MPP | 51 |
| III.1.3 | MPPT par réseau de neurones | 54 |
| III.1.3.1 | Les réseaux de neurones | 54 |
| III.1.3.2 | Utilisation des réseaux de neurones pour la recherche du MPP | 62 |
| III.2 | Commande du système éolien | 64 |
| III.2.1 | Architecture du dispositif de commande | 64 |
| III.2.2 | Extraction du maximum de la puissance du vent | 64 |
| III.2.2.1 | Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation | 66 |
| III.2.2.2 | Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation | 68 |
| III.2.3 | Commande du convertisseur côté MADA | 69 |
| III.2.3.1 | Choix du référentiel pour le modèle de la MADA dans le repère dq | 70 |
| III.2.3.2 | Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique | 72 |
| III.2.3.3 | Génération des courants rotoriques de référence | 75 |
| III.3 | Commande du convertisseur côté réseau | 76 |
| III.3.1 | Contrôle des courants transitant dans le filtre RL | 77 |
| III.3.2 | Contrôle de la tension du bus continu | 79 |
| III.4 | Résultats de simulation | 80 |
| III.4.1 | Simulations de la chaîne photovoltaïque | 80 |
| III.4.1.1 | Fonctionnement du système photovoltaïque sous des condi- tions nominales | 81 |
| III.4.1.2 | Comportement du système face à un changement de l'éclairement | 83 |
| III.4.1.3 | Comportement du système face à un changement de température | 84 |
| III.4.2 | Simulation de la chaîne éolienne | 85 |

| | |
|--|------------|
| III.4.3 Simulation de la connexion au réseau | 87 |
| IV Application | 89 |
| IV.1 Introduction | 90 |
| IV.2 modelisation du batiment | 90 |
| IV.2.1 presentation de l'outil de simulation"COMFIE" | 90 |
| IV.2.2 Modélisation du bâtiment | 91 |
| IV.2.2.1 Le bâti | 92 |
| IV.2.2.2 Les scénarios d'utilisation du bâtiment | 94 |
| IV.3 Résultats | 95 |
| A Sunpower E20 333 | 100 |
| B Paramètres de l'éolienne | 103 |

Table des figures

| | | |
|-------|---|----|
| I.1 | Composition d'un générateur PV sur un bâtiment | 8 |
| I.2 | Photovoltaïque autonomes | 9 |
| I.3 | Photovoltaïque hybride | 9 |
| I.4 | Photovoltaïque connecté au réseau | 10 |
| I.5 | exemples de système photovoltaïque sur toit terrasse | 11 |
| I.6 | exemples de verrières photovoltaïques | 11 |
| I.7 | système photovoltaïque en bardage | 12 |
| I.8 | brise-soleil photovoltaïque | 12 |
| I.9 | Le projet du Cor building à Miami | 14 |
| I.10 | Schéma de principe d'un système éolien | 14 |
| I.11 | Turbines éoliennes en amont et en aval | 16 |
| I.12 | Turbines à axe vertical | 17 |
| I.13 | Système de conversion éolien avec SCIG à vitesse fixe | 18 |
| I.14 | Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable | 18 |
| I.15 | Carte d'ensoleillement mondiale [11] | 20 |
| I.16 | Ensoleillement en Algérie | 20 |
| I.17 | Répartition du potentiel éolien en Algérie | 21 |
| II.1 | Éléments du générateur PV [50] | 26 |
| II.2 | Le modèle à une diode idéal et pratique de la cellule PV | 27 |
| II.3 | Courbe I-V d'un panneau PV | 28 |
| II.4 | Caractéristique électrique du panneau photovoltaïque pour différents éclaircements | 30 |
| II.5 | Influence de la température sur caractéristique électrique | 30 |
| II.6 | Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. | 31 |
| II.7 | Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau. | 32 |
| II.8 | Modèle mécanique de la turbine éolienne. | 34 |
| II.9 | Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. | 35 |
| II.10 | Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques. | 38 |
| II.11 | Connexion du CCR au réseau électrique. | 39 |
| II.12 | Schéma de principe d'un hacheur : (a) abaisseur (b) élévateur | 41 |
| II.13 | Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension | 41 |

| | |
|--|----|
| II.14 Redresseurs triphasés : (a) P_3 , (b) PD_3 | 43 |
| III.1 (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge. (b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous des conditions climatiques fixes avec une charge résistive variable (R1, R2, R3, R4)[50] | 45 |
| III.2 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'un convertisseur DC-DC [23] | 46 |
| III.3 Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O | 47 |
| III.4 L'organigramme de l'algorithme perturb and observe | 48 |
| III.5 Fonctions d'appartenances | 49 |
| III.6 Structure d'un contrôleur flou[33] | 50 |
| III.7 Signe de $E(k) = \frac{dP}{dV}$ indiquant la position du MPP | 52 |
| III.8 Fonctions d'appartenance de l'entrée E | 53 |
| III.9 Fonctions d'appartenance de l'entrée ΔE | 53 |
| III.10 Fonctions d'appartenance de la sortie ΔD | 54 |
| III.11 Neurone biologique[40] | 55 |
| III.12 Neurone artificiel[40] | 56 |
| III.13 Single-Input Neurone [19] | 56 |
| III.14 Multiple-Input Neurone [19] | 57 |
| III.15 Fonctions d'activation [19].(a)fonction Heaviside (b)fonction linéaire (c)fonction linéaire à seuil (d)fonction sigmoïde | 57 |
| III.16 Réseaux multicouche [40] | 58 |
| III.17 Réseau à connexions locales [40] | 59 |
| III.18 Réseau à connexions récurrentes [40] | 59 |
| III.19 Réseau à connexion complexe [40] | 60 |
| III.20 Réseau de neurones approximateur | 61 |
| III.21 schéma de commande par réseau de neurones | 63 |
| III.22 Architecture de commande du système éolien. | 64 |
| III.23 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. | 65 |
| III.24 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation. | 67 |
| III.25 Coefficient de puissance C_p en fonction de pour $\beta = 2^\circ$ | 67 |
| III.26 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation. | 68 |
| III.27 Principe de la commande du CCM. | 70 |
| III.28 Référentiel diphasé dq lié au champ tournant statorique. | 71 |
| III.29 Etablissement des angles de transformation à l'aide d'une PLL. | 72 |
| III.30 Principe du contrôle des courants rotoriques de la MADA. | 74 |
| III.31 Commande du CCM. | 75 |
| III.32 Principe de la commande du CCR. | 77 |
| III.33 Contrôle des courants circulant dans le filtre RL. | 78 |
| III.34 Boucle de régulation de la tension du bus continu. | 79 |
| III.35 Commande du CCR. | 80 |

| | |
|---|----|
| III.36 Réponse du système photovoltaïque à une température de 25°C et un ensoleillement de 1000 W/m^2 | 81 |
| III.37 Réponse du système photovoltaïque en régime permanent | 82 |
| III.38 Réponse du système photovoltaïque à des variations de l'ensoleillement à une température constante de 25°C | 83 |
| III.39 Réponse du système photovoltaïque à des variations de la température à éclairage constant de 1000 W/m^2 | 84 |
| III.40 Profil du vent | 86 |
| III.41 Puissance mécanique | 86 |
| III.42 Puissance statoriques active | 86 |
| III.43 Puissance statoriques réactive | 86 |
| III.44 Les courants rotoriques dans le plan (d,q) | 86 |
| III.45 Les tensions rotoriques dans le plan (d,q) | 86 |
| III.46 Les puissances rotoriques active et réactive | 86 |
| III.47 Régulation du bus continu | 87 |
| III.48 Tension et courant de sortie | 87 |
| IV.1 Structure des échanges d'information au sein de COMFIE | 91 |
| IV.2 Plan du rez-de-chaussée modélisé | 92 |
| IV.3 Plan du premier étage modélisé | 92 |
| IV.4 Représentation en 3 dimensions du bâtiment modélisé | 93 |
| IV.5 Comparatif de la puissance dissipée chauffage/climatisation | 96 |
| IV.6 comparatif du confort au sein des trois structures | 96 |
| IV.7 Synthèse des résultats pour un bâtiment passif intelligent | 97 |
| IV.8 Synthèse des résultats pour un bâtiment passif | 97 |
| IV.9 Synthèse des résultats pour un bâtiment ordinaire | 97 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| III.1 Exemple d'une table d'inférence | 51 |
| III.2 Table de la base des règles floues | 54 |
| B.1 Paramètres de la turbine et de la MADA | 104 |

Introduction générale

On assiste à un accroissement de plus en plus important de la population mondiale depuis les années 1950. En effet, celle-ci tend à doubler tous les demi-siècles pour atteindre un seuil maximal de 10 voire 12 milliards d'êtres humaines dans les années 2050. Cet accroissement de la population, auquel s'ajoute une société de consommation de plus en plus gourmande, va entraîner de graves problèmes de nature environnementale dans le futur. On peut par exemple citer l'émission des gaz à effet de serre ainsi que ses nombreuses conséquences sur la modification du climat.

À l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment représente 30 à 40 % de la consommation totale d'énergie et une forte part des impacts environnementaux d'origine anthropique. En effet, le secteur de l'habitat et du tertiaire en Algérie, d'après les statistiques de l'APRUE (Agence Nationale de la Promotion et de la Rationalisation de l'Utilisation de l'énergie), consomme 41% du total de l'énergie consommée et il produit 6842.2.8 tonnes de CO₂, ce qui est équivalent à 16% du total de la quantité des gaz à effets de serre émise en Algérie et ce pourcentage ne cesse d'augmenter. De ce fait, ce secteur présente un fort potentiel d'amélioration à la fois sur les plans énergétiques et environnementaux.

Des solutions, appliquées au bâtiment, amènent à travailler simultanément sur la consommation du bâtiment, sa structure et ses divers équipements, dès la phase de conception. Le bâtiment à énergie positive associe une grande partie de ces solutions. Ces bâtiments, combinant faibles besoins énergétiques et production énergétique d'origine renouvelable, sont encore peu répandus, 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.

Les moyens de production d'énergie utilisant les éoliennes et le photovoltaïque ont des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Dans ce travail nous voulons assurer une alimentation au bâtiment sans interruption, maximiser le bilan d'énergie provenant des sources d'énergies renouvelables et injecter l'énergie excédentaire au réseau électrique. Par ailleurs, la bonne qualité de l'énergie doit être garantie par rapport aux normes de sécurité des personnes et d'usage des équipements.

Le travail présenté ici est organisé en quatre chapitres

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différents concepts de bâtiments performants, un état de l'art de ce système est donné. Notre travail portant sur un système d'énergie hybride éolien/photovoltaïque destiné à alimenter un bâtiment intelligent connecté au réseau électrique.

Le deuxième chapitre présente une modélisation des composants de notre systèmes éolien/photovoltaïque dans le but d'analyser le comportement dynamique du système complet face aux variations climatiques d'abord une modélisation du système photovoltaïque et éolien ensuite celle de l'électronique de puissance nécessaire à la mise au point de notre système.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons une introduction à la logique floue et aux reseaux de neurones en vue d'optimiser l'énergie photovoltaïque, une comparaison entre les trois commandes MPPT perturb and observe, floue et neuronale sera faite pour ensuite aborder la commande vectorielle de la MADA. Ensuite, On abordera le probleme de connexion au réseau électrique.

Dans le quatrième chapitre une simulation du bâtiment avec différentes configurations a été faite pour comparer leurs performances énergétiques et l'impact sur le dimensionnement des générateurs d'énergies renouvelables.

On terminera par une conclusion générale ou on abordera les perspectives pour les travaux à venir.

Chapitre I

État de l'Art sur les Bâtiments à Énergie 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 XXI ème siecle. 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 energies renouvelables : vent, soleil, geothermie superficielle, biomasse ... Le bâtiment assure ses propres besoins, et l'énergie non consommée est restituée sur le reseau qui devient une immense cooperative de production. C'est le concept du bâtiment à énergie positive.

Ce premier chapitre vise à poser le cadre précis de notre sujet. Pour cela, notre but est de définir le concept du bâtiment à énergie positive et le situer par rapport aux différents concepts des bâtiments performants existants.

I.2 Concepts de bâtiments performants

Un concept de bâtiment performant est défini par un ensemble d'objectifs et de solutions techniques destinés à guider le concepteur qui en s'appuyant sur divers outils d'aide à la conception, associe des techniques, matériaux, structures et équipements de manière à atteindre au mieux les objectifs fixés. Après la mise en service du bâtiment, une phase d'évaluation permet au maitre d'oeuvre et au maitre d'ouvrage de quantifier les performances réelles du bâtiment et de les comparer aux objectifs originaux. Dans cette partie, l'analyse de différentes définitions et dénominations rencontrées dans la littérature amène à proposer une typologie des principaux concepts de bâtiments performants et à en identifier les principales caractéristiques.

I.2.1 Types de bâtiments performants

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Ils sont alors associés à un cahier des charges décrivant leurs objectifs ou à une méthode d'évaluation de leur niveau de performance. Leurs dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment. Dans la classification des bâtiments, deux approches se distinguent : une approche énergétique et une autre prenant en compte le coté économique et l'impact environnemental.

Approches énergétiques

Cette approche ne prend en considération que la consommation énergétique du bâtiment. Elle est classifiée comme suit :

Bâtiment à Basse Consommation : ou " basse énergie " (en anglais : low energy house) Ce bâtiment se caractérise par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standards. Ce premier niveau de performance peut être atteint par l'optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs. Ce concept ne comprend a priori aucun moyen de production locale d'énergie, sans toutefois l'exclure.

Bâtiment "passif" Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids, il est le plus souvent associé à la ventilation.

Bâtiment "zéro énergie" ou "zéro net" (en anglais : net zero energy house) Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul.

Bâtiment "à énergie positive" (en allemand : Plusenergiehaus) Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau " zéro énergie " il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique.

Bâtiment Autonome Un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux.

Approche économique et écologique

Cette approche vise, d'une part, à apprécier la qualité environnementale des bâtiments et d'autre part à traiter l'aspect du coût de la consommation du bâtiment. On distingue les types suivants :

” **Zero utility cost building** ” On retrouve cette approche aux USA et au Japon. Ils désignent les bâtiments dont la facture est nulle : la vente d’une partie de la production énergétique du bâtiment compense les frais engendrés par l’achat de l’énergie consommée (électricité, hydrocarbures etc.). Cette approche est privilégiée dans l’habitat social pour lequel la facture énergétique représente une part importante du budget des occupants.

” **Bâtiment neutre en carbone** ” Cette expression désigne un bâtiment dont le fonctionnement n’induit aucune émission de CO_2 . Cette orientation, qui s’inscrit dans la démarche du protocole de Kyoto, vise à réduire la participation du bâtiment à l’accroissement de l’effet de serre. La démarche ”zéro carbone” est généralement associée à un mode de vie, dont la portée, au-delà du bâtiment, englobe les modes de déplacement, voire les modes de consommation des occupants du bâtiment. L’une des conséquences de cette démarche est l’utilisation exclusive de ressources énergétiques renouvelables.

Bâtiment ” vert ”, ” durable ”, ” soutenable ” ou ” écologique ” Ce type de bâtiments est construit à partir de matériaux écologique. Il inclut également des espaces verts et une enveloppe végétalisée. Il vise à réduire l’impact environnemental du bâtiment.

I.3 Définition du bâtiment à énergie positive

Le concept de bâtiment à énergie positive, évoqué par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment en France (CSTB) et par quelques architectes, n’a jamais été rigoureusement défini du fait de l’absence de réglementation à son sujet. Cependant, il a été défini par de nombreux experts dans le domaine du bâtiment comme étant un bâtiment produisant plus d’énergie qu’il n’en consomme. Ce concept présente un haut niveau de performance et regroupe forcément tous les autres concepts tels que les bâtiments basse consommation, bâtiments verts, bâtiments producteur d’énergie. L’intermittence est le problème majeur des énergies renouvelables. Pour remédier à cela des techniques de stockage, de gestion et de régulation sont nécessaires. L’importance de la mise au point de ces aspects se manifeste davantage du fait de la multitude des ressources en énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, solaire thermique, géothermie, microcogénération). Ces systèmes sont appelés, les systèmes multi-énergie.

I.4 Sources d'énergies renouvelables

I.4.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques à base de silicium, ont la capacité de transformer l'énergie photonique en énergie électrique. Le courant continu ainsi produit est directement utilisable. La fabrication des panneaux solaires est actuellement coûteuse bien que la matière première (silice) soit abondante et peu onéreuse. Cela s'explique par une énergie significative nécessaire à la production des cellules. De réels progrès ont toutefois été réalisés. À l'heure actuelle, il faut quand même 5 à 8 ans pour qu'un panneau produise l'énergie nécessaire à sa construction. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie employée. Des avancées technologiques sont en cours de réalisation. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant la technique, désormais classique, et éprouvée de recherche du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracker : MPPT). Cette solution est également utilisable pour la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont faciles à mettre en oeuvre. Leur intégration dans un bâtiment peut aussi ajouter une touche esthétique. Ils apportent une bonne réponse aux besoins énergétiques limités dans les sites isolés et dispersés (télécommunication, balises maritimes...).

L'énergie photovoltaïque est en très forte progression : en 2001, l'Europe comptait environ 250 MW installés ; en 2003, ce chiffre est monté à 560 MW [26].

I.4.1.1 Composition d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque ne se limite pas aux " panneaux solaires ", un générateur photovoltaïque installé sur un bâtiment est généralement composé de :

- Modules photovoltaïques qui convertissent la lumière en électricité courant continu,
- Structure support pour modules,
- Accessoires de fixation, visserie, joints, (profilés aluminium),
- Liaisons électriques entre boîtes de jonction et onduleurs (courant continu),
- Onduleurs installés dans le local Poste HT/BT, TGBT, qui convertissent le courant continu en alternatif,
- Organes de coupure électrique et de sécurité
- Appareils de mesure et afficheur,
- Tableau général de regroupement.

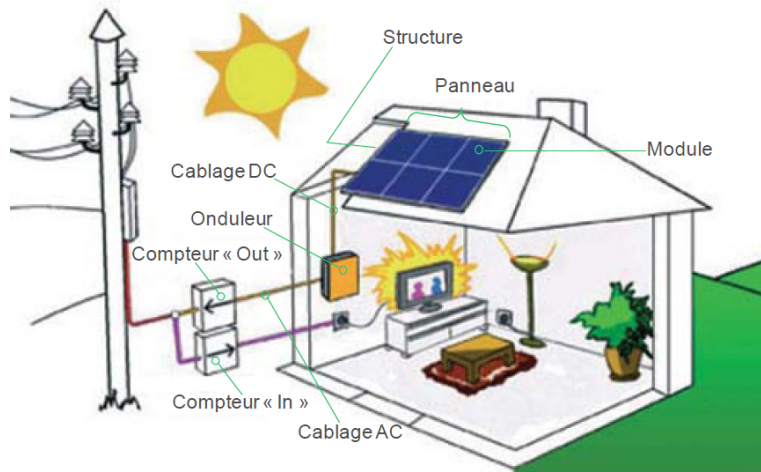


FIGURE I.1 – Composition d'un générateur PV sur un bâtiment

I.4.1.2 Technologies de modules photovoltaïques

On rencontre plusieurs technologies au niveau des cellules photovoltaïques. Tout d'abord celles basées sur le silicium cristallin (les cellules bleues) avec 85% de part de marché, qui se déclinent en monocristallines ou en multicristallines (la plus courante aujourd'hui). Dans cette technologie, les cellules sont mises en série et assemblées dans les modules photovoltaïques. Sa maturité garantit des performances élevées et une fiabilité reconnue. On trouve aussi des modules basés sur des technologies en couches minces inorganiques sur trois filières : le tellurure de cadmium, le silicium en couche minces dont le silicium amorphe et les chalcopyrites dont le CIGS(Cuivre Indium Gallium Sélénium/Soufre).

Ces solutions ont moins d'expérience industrielle et présentent des performances standards plus faibles que le silicium cristallin mais des coûts de fabrication moindre et une moindre sensibilité aux conditions dégradées. L'aspect uniforme des modules à structure monolithique habituelle des modules couches minces sont appréciés pour leur esthétique neutre. La structure couche mince permet de réaliser des modules flexibles et légers souvent appliqués aux toits à faible capacité de charge.

On trouve aussi les technologies basées sur les semi-conducteurs III-V (typiquement arséniure de gallium) mais le coût de cette filière ne rend l'application économique raisonnable qu'avec une approche de concentration optique et donc applicable sur les centrales photovoltaïques au sol dans les régions très ensoleillées. Les solutions basées sur des cellules photovoltaïques organiques commencent à apparaître, les performances et la durabilité sont limitées mais elles permettent de faire des modules flexibles qui ont peu de pertes en conditions dégradées avec un potentiel de bas coût important et une

structure propice à la semi-transparence.

I.4.1.3 Types de systèmes photovoltaïques

En fonction du service et des applications recherchées les systèmes photovoltaïques peuvent être classifiés comme suit :

- Autonomes : Les systèmes photovoltaïques autonomes sont des systèmes qui alimentent l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique et sans dépendre d'aucune autre source d'énergie (Figure suivante) .Dans la majorité des cas, les systèmes autonomes exigent des des batteries de stockages [pfe], ils sont souvent utilisés dans les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne...

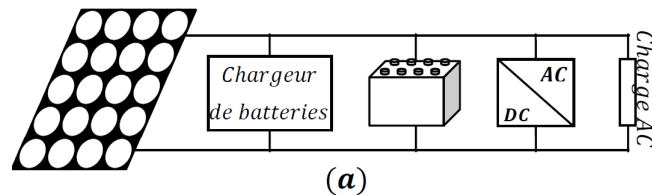


FIGURE I.2 – Photovoltaïque autonomes

- Hybride : L'énergie photovoltaïque peut être ajoutée à d'autres sources d'énergies comme l'éolienne, le diesel... (Figure suivante), et cela afin de fournir la puissance pendant 24 heures économiquement et efficacement. L'intégration de ces sources d'énergie forme un système énergétique hybride, qui est une excellente option pour assurer la continuité du service électrique et avoir plus d'énergie avec un coup réduit [pfe].

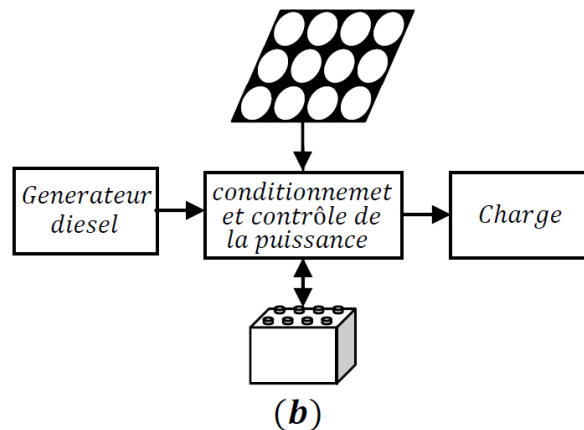


FIGURE I.3 – Photovoltaïque hybride

- **Connecté au réseau** : Dans ce cas, des panneaux solaires photovoltaïques sont reliés à un réseau par des convertisseurs électriques (Figure suivante). Un système PV connecté au réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin. Ces systèmes peuvent être petits, tels que les systèmes résidentiels, ou des grands systèmes cas d'une centrale électrique photovoltaïque [pfe].

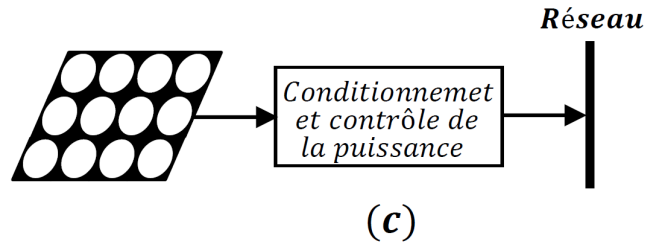


FIGURE I.4 – Photovoltaïque connecté au réseau

I.4.1.4 Intégration de système photovoltaïque dans les bâtiments

Plusieurs possibilités se présentent pour intégrer les panneaux photovoltaïques dans les BEP :

Structures sur toit La structure est constituée de platines fixées mécaniquement ou par collage sur le système d'étanchéité, une reprise d'étanchéité permettant d'assurer l'étanchéité du bâtiment. Le système photovoltaïque est relié à ces platines, éventuellement au moyen de rails.

Le système est principalement constitué :

- de platines fixées sur le système d'étanchéité
- d'un système de fixation des modules sur les platines, éventuellement réalisé avec des rails porteurs, permettant un réglage pour s'adapter aux imperfections géométriques de la structure
- d'un module photovoltaïque
- d'éléments de visserie en acier inoxydable



FIGURE I.5 – exemples de système photovoltaïque sur toit terrasse

Structure verrière Ce type de structure est parfaitement adapté aux verrières à vitrage simple ou double. Sa finition technique (adaptation à la structure primaire, étanchéité) et son esthétisme sont parfaitement adaptés à son intégration au bâti.



FIGURE I.6 – exemples de verrières photovoltaïques

Structure bardage rapporté La structure bardage rapporté est étudiée pour la fixation et le maintien de modules solaires photovoltaïques sur une façade en béton ou en maçonnerie d'éléments. Les modules seront assemblés par panneaux sur une structure constituée uniquement de profilés d'aluminium ou de chevrons bois. Des pattes de fixations seront fixées à la façade par l'intermédiaire de chevilles mécaniques ou chimiques dimensionnées selon les efforts de poids propre et de vent.



FIGURE I.7 – système photovoltaïque en bardage

Structure brise-soleil Cette intégration présente l'avantage complémentaire, outre la production d'électricité, de couper le rayonnement direct du soleil sur les façades des bâtiments permettant un apport énergétique solaire minimal en été.

En utilisant des modules bi-verre, la lumière naturelle diffusée par les interstices des cellules PV sera filtrée. On obtiendra ainsi une garantie de confort visuel et de fraîcheur l'été.

Ce type de structure comprend :

- des consoles de fixation au bâtiment,
- des éléments de fixation des modules sur les consoles,
- tous les accessoires de fixation et passages de câbles (brides, visseries, etc.).

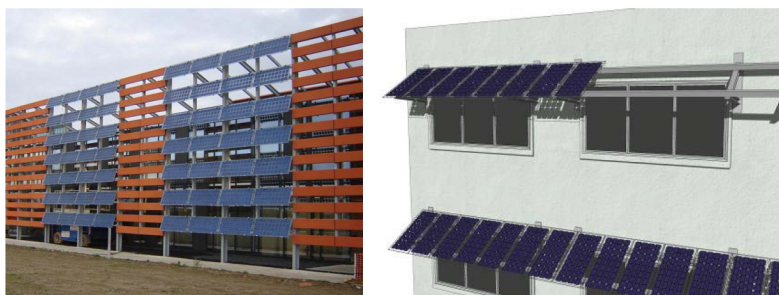


FIGURE I.8 – brise-soleil photovoltaïque

I.4.2 L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement. Exploitée depuis l'antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient un taux de croissance de 30% par an depuis une dizaine d'années. L'Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, comptait environ 15000 MW de puissance installée en 2000. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance installée dans le monde. Les prévisions pour 2010 font état d'une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW [26].

L'énergie éolienne doit capter la force du vent et donc, se situer à une certaine hauteur pour obtenir un rendement acceptable. Cette énergie n'est pas utilisée à petite échelle sur l'habitat directement mais en complément de celui-ci. L'infrastructure que ce type d'énergie nécessite est très imposante due au fait qu'il faut capter les courants aériens, il s'agit de l'éolienne. Pouvant produire jusqu'à 6000 kWh d'électricité, c'est un élément très attractif énergétiquement parlant. Mais sa taille très élevée se fonde difficilement dans le paysage, sur terre comme sur mer, et est souvent l'objet de critiques comme, par exemple, en suisse où l'éolienne se trouvant sur le site « Collonges » en Valais a suscité de nombreuses plaintes. Elle peut toutefois être intégrée dans des bâtiments possédant une taille plus imposante comme les buildings. Une structure imposante qui se trouve être très contraignante au niveau des projets plus petits auquel doit répondre un architecte.



FIGURE I.9 – Le projet du Cor building à Miami

I.4.2.1 Classement des Turbines Eoliennes

Après ses premières utilisations à l'époque de la Perse Antique, la technologie qui permet de profiter de l'énergie du vent a évolué sous diverses formes et types de machines. La structure de base des turbines éoliennes consiste aujourd'hui en une turbine pour transformer l'énergie cinétique en énergie mécanique, un système d'engrenage pour démultiplier la vitesse de rotation du rotor, une machine électrique pour convertir l'énergie mécanique en électricité. Un schéma de principe est représenté dans la figure I.10. Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

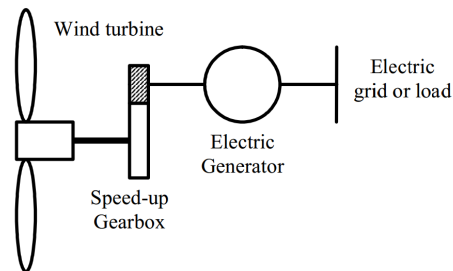


FIGURE I.10 – Schéma de principe d'un système éolien

Turbines Eoliennes à Axe Horizontal (HAWT) Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage (cut-in) et un coefficient de puissance (rapport entre la puissance obtenue et la puissance de la masse d'air en mouvement) relativement élevé [25]. Toutefois, la boîte de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Par ailleurs l'orientation automatique de l'hélice face au vent nécessite un organe supplémentaire (« queue », « yaw control »...).

Selon son nombre de pales, une HAWT est dite mono-pale, bipale, tripale ou multi-pale. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité et, par ailleurs, les pertes aérodynamiques par poussée (drag) sont minimales. Cependant, un contrepoids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela. Tout comme les rotors mono-pales, les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour ([1]). Donc, pratiquement toutes les turbines éoliennes installées ou à installer prochainement sont du type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement.

Suivant leur orientation par rapport au vent, les HAWT sont dites en « amont » (upwind) ou en « aval » (down-wind). La figure I.11 montre les deux types mentionnés. Les premières ont le rotor face au vent ; puisque le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de « l'ombre de la tour » (tower shadow) est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour : il peut donc y avoir une charge inégale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour. De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est largement prédominante.

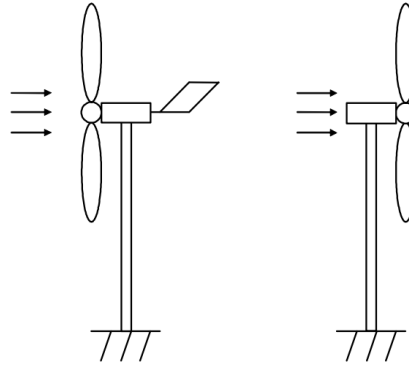


FIGURE I.11 – Turbines éoliennes en amont et en aval

Turbines Eoliennes à Axe Vertical (VAWT) L'axe de rotation d'une VAWT est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages est disposé au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique [25]. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol. Ces turbines ne disposent pas de commande d'angle de pale comme certaines HAWT. La figure I.12 montre trois conceptions de VAWT.

Un inconvénient, pour certaines VAWT, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage. D'autres VAWT utilisent la poussée (drag) plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et un moindre rendement. La majorité des VAWT tourne à faible vitesse, ce qui est très pénalisant dans les applications de génération d'électricité avec connexion au réseau public (50 ou 60 Hz) car la boîte de vitesses doit permettre une importante démultiplication. Le faible rendement aérodynamique et la quantité de vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol constituent les principaux handicaps des VAWT face aux HAWT.

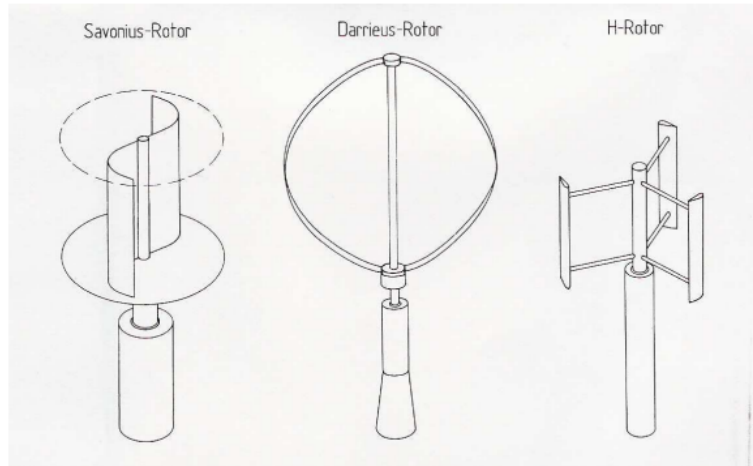


FIGURE I.12 – Turbines à axe vertical

I.4.2.2 Générateurs

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit.

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (<20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique.

Générateur Asynchrone (IG) Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (SCIG) Jusqu'à présent le SCIG correspond au choix prépondérant de par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite [1]. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur I.13, ou par la mise en oeuvre d'un convertisseur statique de puissance I.14.

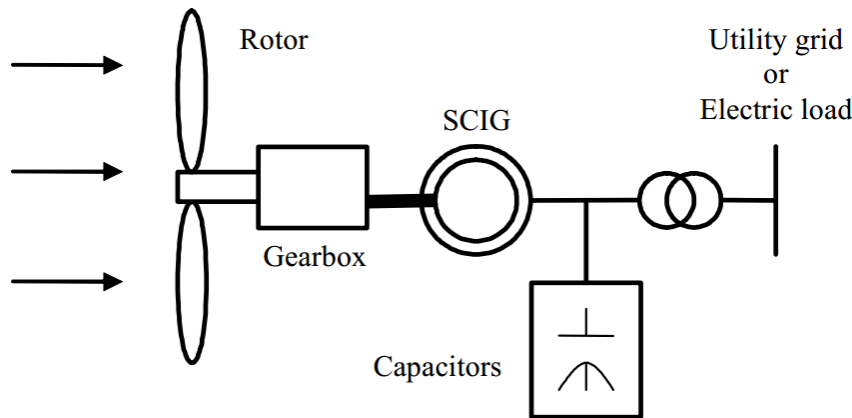


FIGURE I.13 – Système de conversion éolien avec SCIG à vitesse fixe

Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (WRIG)

Générateur Synchronique (SG) L'avantage du générateur synchronique sur l'IG est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du SG peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le SG est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique I.14, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (PMSG) est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW, le générateur synchronique est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [1].

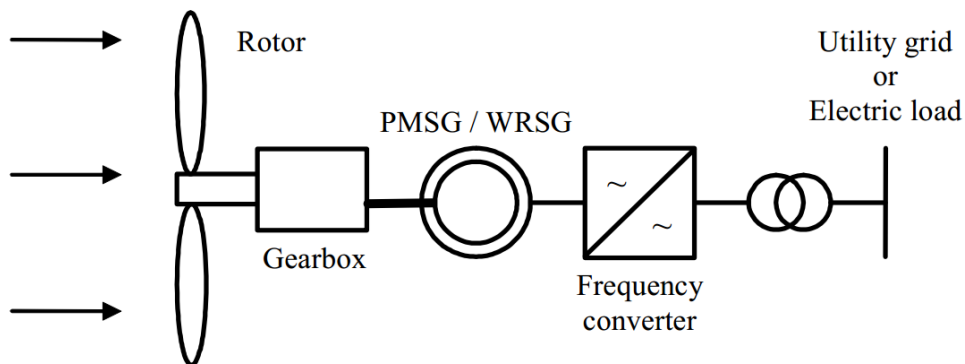


FIGURE I.14 – Système avec générateur synchronique pour un fonctionnement à vitesse variable

Générateur Synchron à Rotor Bobiné (WRSG) La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en oeuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

Générateur Synchron à Aimants Permanents (PMSG) La caractéristique d'auto excitation du PMSG lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [1]. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le générateur le moins compétitif.

I.5 Potentiel algérien en énergies renouvelables

I.5.1 Potentiel solaire

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen et l'un des plus grands au monde. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le Sahara décrochant ainsi le titre de l'endroit le plus ensoleillé au monde. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. La carte I.15 illustre la répartition de l'ensoleillement du territoire national.

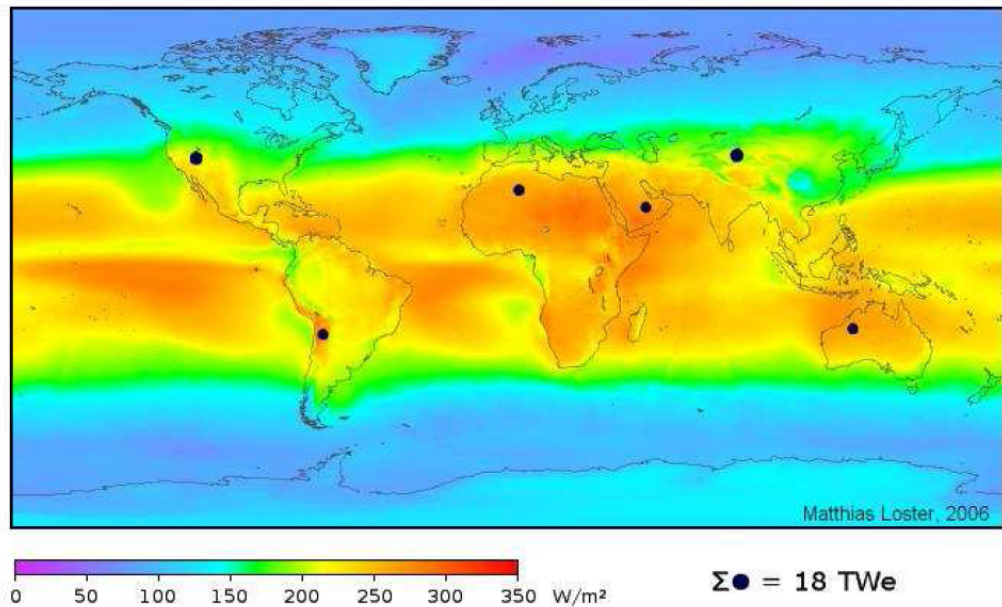


FIGURE I.15 – Carte d’ensoleillement mondiale [11]

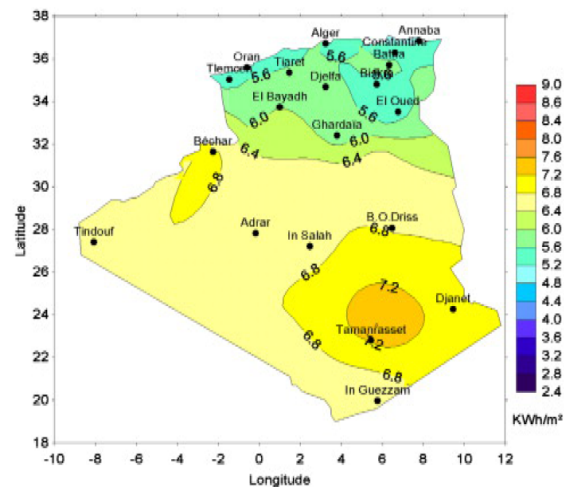


FIGURE I.16 – Ensoleillement en Algérie

I.5.2 Potentiel éolien

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d’Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l’eau particulièrement

sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, en particulier au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar.

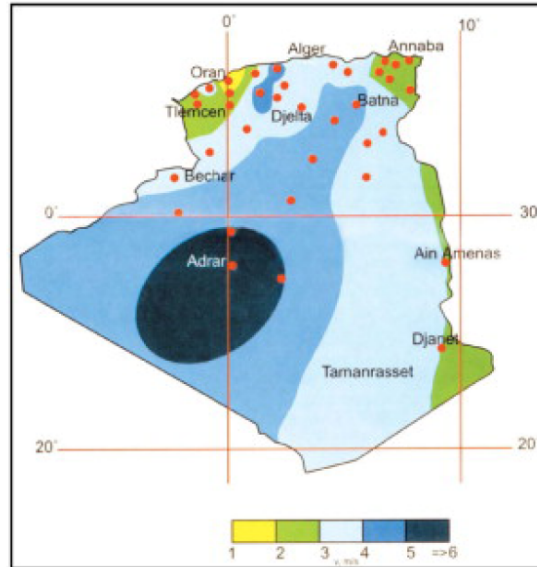


FIGURE I.17 – Répartition du potentiel éolien en Algérie

I.5.3 Energies géothermiques

Plus de 200 sources d'eau chaude ont été répertoriées dans le nord-est et le nord-ouest de l'Algérie. Environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C, la plus chaude étant située à Biskra (118°C). Plus au sud, délimitée par Biskra au nord, In Salah au sud et Adrar à l'ouest, la nappe albiennne constitue une zone de plusieurs milliers de km², caractérisée par une eau à température moyenne de 57°C. L'ensemble du débit d'exploitation des sources et de cette nappe représente une puissance estimée à 700MW/an [2].

I.6 Politique nationale concernant les énergies renouvelables

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 4% par année. La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure. En outre, et vu l'importance des énergies renouvelables pour le développement durable, les autorités algériennes ont promulgué une loi visant à promouvoir les énergies renouvelables, inciter à la recherche

dans ce domaine et encourager son utilisation afin de compléter ou substituer les énergies fossiles dont nous sommes totalement dépendants. Cette loi définit les différents procédés de production d'énergie à partir de sources renouvelables, en l'occurrence, l'énergie du rayonnement solaire, la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie hydraulique et enfin les matériaux et les techniques. Elle a aussi mis en place l'observatoire national de promotion des énergies renouvelables qui vise à la promotion de la recherche dans le domaine.

Malgré la promulgation d'une telle loi, il est à noter que plusieurs points n'ont pas été traités et qui doivent faire objet de travaux de recherche et de projets de loi. Le premier point est le volet régulation de la consommation énergétique des bâtiments en Algérie en définissant des labels de haute performance énergétique propres à l'Algérie. Le second point consiste à tracer une vraie stratégie d'incitation à la production d'énergies renouvelables en encourageant la production locale (au niveau des maisons et des bâtiments). Cela est possible en travaillant en collaboration avec les différents acteurs de l'énergie au niveau national pour récupérer l'énergie produite localement et fixer le prix d'achat de cette dernière. Les deux partis tireront profit de cette démarche en diminuant le coût des investissements et la charge de production pour les sociétés d'une part, et pour diminuer la facture d'énergie et constituer une source de revenus pour les particuliers d'autre part. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 375 MW d'ici 2020, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 4% de l'électricité totale produite (0,02% aujourd'hui). Avec une production effective de 33,8 TWh et plus de 245.000 km de réseaux de distribution [43].

I.7 Environnement et Coût des Energies Renouvelables

Vis-à-vis du respect de l'environnement, les énergies renouvelables ont un avantage majeur, même si leur intérêt économique à court terme n'est pas toujours avéré. Ainsi, en 2001, les éoliennes installées au Danemark -un des pays parmi les mieux équipés- ont permis d'éviter 3.5 millions de tonnes de CO_2 , 6450 tonnes de SO_2 , 6000 tonnes d'oxyde azotique et 223000 tonnes de cendres volantes [30].

Si l'on tient compte de la pollution produite lors de la fabrication des différentes technologies, l'énergie éolienne est la moins polluante avec seulement 9 g de CO_2 par kWh [30]. La biomasse est également très bien placée car elle ne contribue pas au réchauffement climatique dans la mesure où le bois, pendant sa croissance, fixe une quantité au moins équivalente de CO_2 . Seul le nucléaire est en mesure de rivaliser avec les énergies renouvelables avec seulement 10 g de CO_2 émis par kWh. Cependant, la production d'électricité nucléaire génère des déchets radioactifs peu complexes à gérer mais sources d'inquiétudes pour l'avenir (en particulier ceux à vie longue, hautement

radioactifs).

Les énergies renouvelables, hors l'hydroélectricité, se heurtent cependant à plusieurs obstacles, dont le plus important est incontestablement économique. A l'heure actuelle, elles sont peu ou pas rentables. A l'exception de l'hydroélectricité - déjà largement exploitée -, les énergies renouvelables souffrent de la comparaison économique avec d'autres sources d'énergie. Quelques exemples suffisent à révéler les écarts.

Alors que le coût d'investissement d'un cycle combiné au gaz naturel est inférieur à 500 euro/kW [30], il est généralement compris entre 1000 et 3000 euro/kW pour l'éolien et entre 3000 et 5000 euro/kW pour le photovoltaïque.. Actuellement, le coût moyen du kWh nucléaire est de l'ordre de 3 à 4 centimes d'euro (c/euro) et de 4 à 8 c.euro, selon le site, dans le cas du kWh d'origine éolienne, la plus compétitive des énergies renouvelables hors hydroélectricité. Toutefois, l'éolien peut rivaliser avec la production d'électricité à partir du gaz naturel et du charbon selon les cours du marché.

Les coûts de production de l'électricité à partir des autres énergies renouvelables sont encore plus hauts (15 c.euro pour la géothermie et jusqu'à 65 c.euro pour le photovoltaïque). Les progrès sont néanmoins très rapides et l'éolien est désormais proche des énergies classiques. En un peu plus de 20 ans, le coût du kWh éolien a diminué de près de 90% (38 c.euro en 1980). De la même manière, les prix des panneaux photovoltaïques baissent d'environ 4% par an depuis 15 ans grâce aux effets de série.

La compétitivité des énergies renouvelables pourrait être dopée si les coûts annexes des différentes énergies étaient pris en compte. La Commission Européenne estime le surcoût lié à la dégradation de l'environnement : entre 2 et 15 c.euro pour une centrale au charbon, entre 3 et 11 c.euro pour une centrale au fioul, au maximum 2.5 c.euro pour les énergies renouvelables. La hiérarchie des coûts de production du kWh à partir des différentes énergies s'en trouve complètement modifiée. La plupart des énergies renouvelables sont alors plus compétitives que les centrales au charbon et au fioul. Actuellement, ces coûts annexes ne sont pas retenus mais des réflexions sont menées sur la mise en place de « certificats verts » (quotas de production d'électricité à partir de renouvelables).

Outre leur manque de compétitivité économique, les énergies renouvelables - en particulier l'éolien et le solaire - ont un inconvénient sérieux : l'intermittence. Leur disponibilité est, en effet, irrégulière puisqu'elle dépend de la vitesse du vent et de l'ensoleillement. En dépit de ces désagréments, des entreprises spécialisées dans la construction éolienne ont émergé, en particulier en Allemagne, au Danemark et en Espagne. Le leader mondial Vestas (Danemark) a doublé son chiffre d'affaires depuis 2000 pour atteindre 1.7 milliards d'euros en 2003. L'utilisation de moyens de stockage permet de réduire les

inconvenients de l'intermittence des sources d'énergie [49].

Chapitre II

Modélisation des Composants du Bâtiment à Énergie Positive.

II.1 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

II.1.1 Introduction

Un système photovoltaïque convertit la lumière du soleil en électricité. L'élément de base de ce système est la cellule photovoltaïque. Un ensemble de cellules forment ce qu'on appelle un panneau photovoltaïque comme le montre la figure II.1.

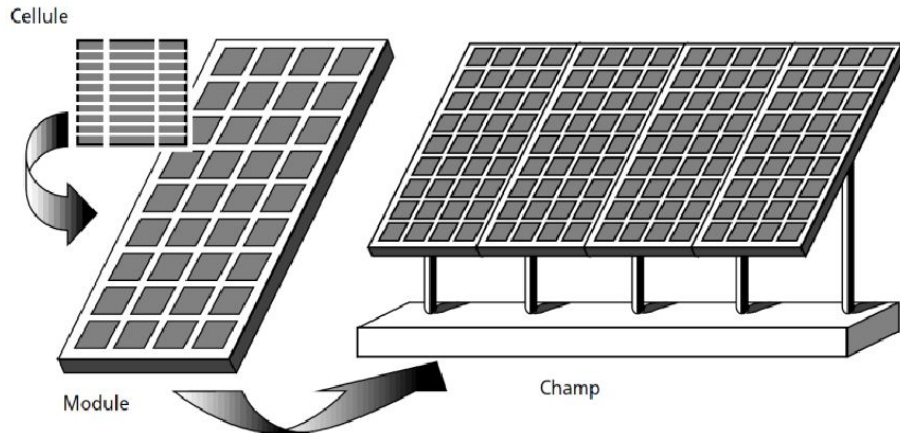


FIGURE II.1 – Éléments du générateur PV [50]

La différence de potentiel et le courant présents au niveau des électrodes des panneaux photovoltaïques (PV) peuvent alimenter directement de petites charges comme les systèmes d'éclairage ou les machines à courant continu. Pour des applications plus sophistiquées, des convertisseurs électroniques sont nécessaires pour produire de l'électricité à partir des panneaux PV. Ces derniers peuvent être utilisés pour réguler le voltage et le courant de la charge, contrôler le flux de puissance dans les systèmes connectés au réseau et en majorité pour la poursuite du point de puissance maximale. Dans le but de simuler le système PV et les composants associés en matière d'électronique de puissance et d'algorithmes de recherche du point de puissance maximale, nous devons tout d'abord modéliser le panneau PV. Il présente une caractéristique I-V non linéaire avec plusieurs paramètres qui doivent être ajustés expérimentalement.

II.1.2 La cellule photovoltaïque

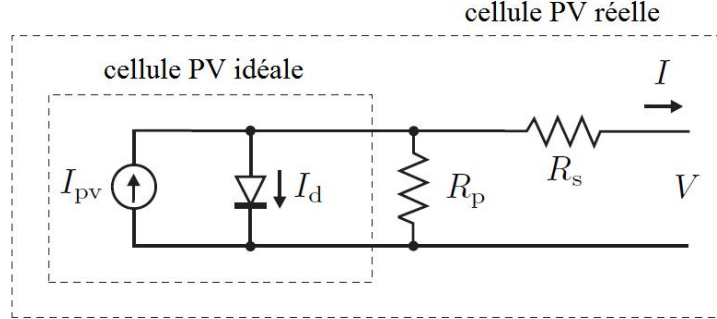


FIGURE II.2 – Le modèle à une diode idéal et pratique de la cellule PV

La figure II.2 montre le circuit équivalent d'une cellule PV idéale. En se basant sur la théorie des semi-conducteurs, l'équation qui décrit mathématiquement la caractéristique I-V d'une cellule PV idéale est :

$$I = I_{pv,cell} - \underbrace{I_{o,cell} \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right]}_{I_d} \quad (\text{II.1})$$

ou $I_{pv,cell}$ est le courant généré par la lumière incidente (proportionnel à l'éclairement), I_d est le courant de la diode d'après l'équation de shockley, $I_{o,cell}$ est le courant inverse de saturation de la diode, q est la charge de l'électron ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C), k est la constante de Boltzman ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T [K] est la température de la jonction p-n, et a est le facteur d'idéalité de la diode.

II.1.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

L'équation II.1 de la cellule PV ne représente pas la caractéristique I-V d'un système PV réel. Par ailleurs, un panneau PV est composé de plusieurs cellules PV réelles. Il peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

ou I_{pv} et I_o sont les courants : photovoltaïque et inverse de saturation, respectivement, du panneau PV et $V_t = N_s \frac{kT}{q}$ le voltage thermique du panneau avec N_s le nombre de cellules connectées en série.

Les cellules connectées en parallèle augmentent le courant alors que celles connectées en série augmentent la tension de sortie. R_s et R_p sont les résistances équivalentes en série et en parallèle du panneau, respectivement, les résistances parallèle et série étant

généralement très grande et très petite, respectivement, elles sont négligées dans quelques travaux comme dans [47] et [41].

L'équation II.2 décrit le modèle à une diode présenté dans la figure II.2, quelques travaux proposent des modèles plus sophistiqués pour d'autres applications, comme le modèle à deux diodes pour prendre en considération le phénomène de recombinaison des porteurs ou encore le modèle à trois diodes pour inclure l'influence d'autres phénomènes négligés dans les modèles précédents. La simplicité et la précision du modèle à une diode combiné aux méthodes d'ajustement des paramètres et les améliorations faites dans [45] le rendent parfait pour la mise au point de l'électronique de puissance nécessaire dans ce travail.

Les fabricants de panneaux PV ne donnent que quelques données expérimentales recueillies dans les conditions d'éclairement et de température standard.

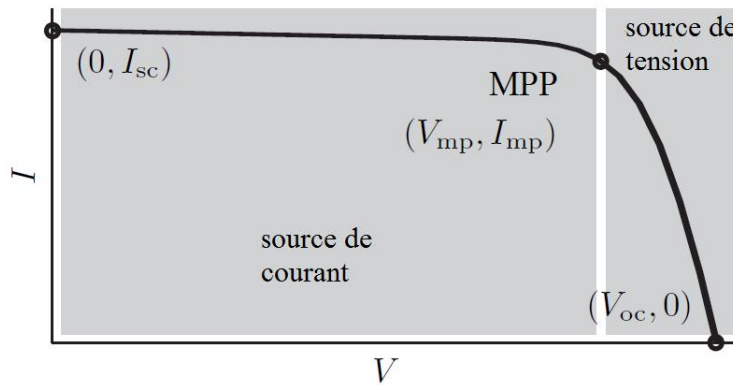


FIGURE II.3 – Courbe I-V d'un panneau PV

La caractéristique I-V du panneau PV présentée dans la figure II.3 dépend des caractéristiques internes du panneau (R_s, R_p) et des influences externes comme l'éclairement solaire et la température. Les panneaux PV peuvent être considérés comme étant une source de tension ou de courant selon le point de fonctionnement qui dépend de la charge.

Le photo courant généré dépend de l'éclairement solaire et de la température selon l'équation suivante [45] :

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.3})$$

avec

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n} \quad (\text{II.4})$$

ou $I_{pv,n}[\text{A}]$ est le photo courant généré dans les conditions nominales (généralement 25°C et 1000 W/m^2), $I_{sc,n}[\text{A}]$ le courant de court-circuit dans les conditions nominales,

$\Delta_T = T - T_n$ (T [K] et T_n [K] sont les températures actuelle et nominale, respectivement), G [W/m²] et G_n [W/m²] sont l'éclairement actuel et nominal, respectivement.

Le courant de saturation de la diode I_o peut être exprimé comme suit [45] :

$$I_o = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta_T}{\exp((V_{oc,n} + K_V \Delta_T)/aV_t) - 1} \quad (\text{II.5})$$

ou $V_{oc,n}$ est la tension de circuit ouvert dans les conditions nominales d'éclairement solaire et de température, K_v et K_i sont les coefficients de température de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit, respectivement. La valeur du facteur d'idéalité a peut être choisie de manière à ajuster le modèle, on a généralement $1 < a < 1.5$.

Dans [45] une méthode pour ajuster R_s et R_p basée sur le fait qu'il n'y a qu'une seule paire (R_s, R_p) qui satisfait l'égalité entre la puissance maximale calculée à partir du model ($P_{max,m}$) et la puissance maximale expérimentale ($P_{max,e}$) au point de puissance maximale expérimental (V_{mp}, I_{mp}).

On aura donc au MPP :

$$I_{mp} = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

D'où

$$R_p = \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{V_t a}\right) - 1 \right] + I_o - I_{mp}} \quad (\text{II.7})$$

L'équation II.7 permet de calculer R_p à partir d'une valeur quelconque de R_s tout en assurant que la courbe I-V passera par le point de puissance maximale expérimental (V_{mp}, I_{mp}).

Le but étant de trouver la valeur de R_s (et donc R_p) qui permet d'avoir $P_{max,m} = P_{max,e}$. On débute par une valeur nulle de R_s on calcule I_{pv} , I_o , R_p puis on résout l'équation II.2 numériquement en utilisant la méthode de Newton-Raphson on calculera alors $P_{max,m}$, dans le cas ou $|P_{max,m} - P_{max,e}| < \epsilon$, on peut considérer alors que notre modèle est précis, dans le cas contraire, on réitère l'opération en incrémentant R_s doucement jusqu'à ce que la condition précédente soit vérifiée.

Pour tout système PV formé de $N_{ser} \times N_{par}$ panneaux on aura alors [46] :

$$I = I_{pv} N_{par} - I_o N_{par} \left[\exp\left(\frac{V + R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}}\right) I}{V_t a N_{ser}}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}}\right) I}{R_p \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}}\right)} \quad (\text{II.8})$$

Ou I_{pv} , I_o , R_s , R_p et V_t sont les paramètres d'un seul panneau, N_{ser} est le nombre de panneaux connectés en séries et N_{par} le nombre de lignes de panneaux connectés en parallèle.

Les figures III.38 et III.39 montrent les résultats de simulation du modèle de panneau Sunpower E20 333 (module de 96 cellules en série) dont les paramètres sont cités dans l'annexe ??.

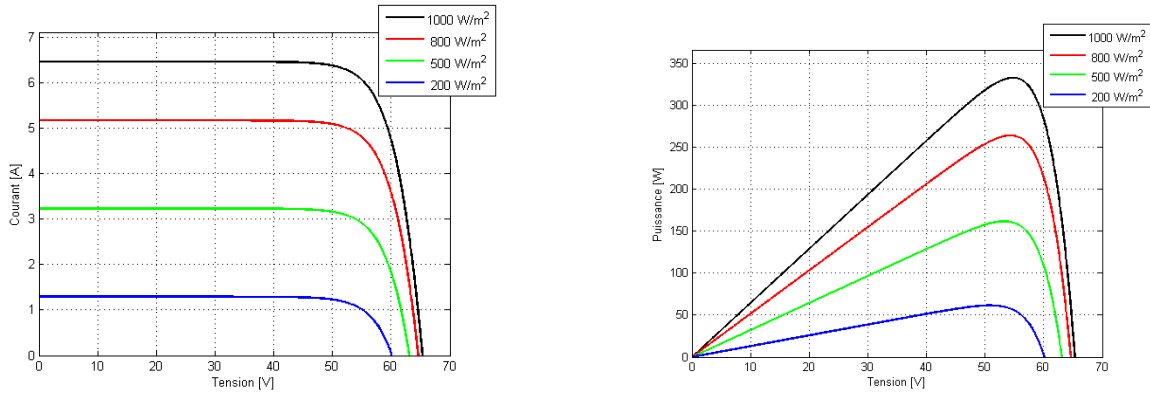


FIGURE II.4 – Caractéristique électrique du panneau photovoltaïque pour différents éclairagements

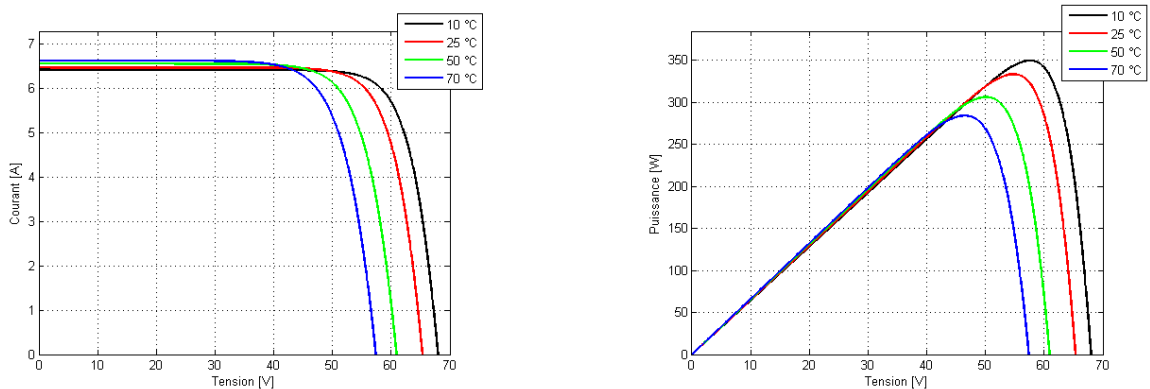


FIGURE II.5 – Influence de la température sur caractéristique électrique

II.2 Modélisation du système éolien basé sur une MADA

II.2.1 Description du système éolien

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré à la Figure II.6. La turbine, via un multiplicateur, entraîne la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le

rotor. Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais. Ces Convertisseurs Côtés MADA et Réseau, notés respectivement CCM et CCR dans la suite de ce mémoire, sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [4]-[26]

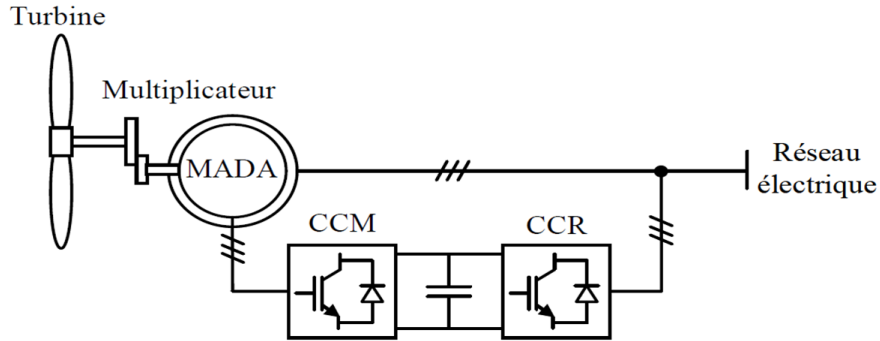


FIGURE II.6 – Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.

Un fonctionnement en mode hypo ou hypersynchrone est possible grâce à la bidirectionnalité des convertisseurs [28]. Le fonctionnement en mode hypersynchrone permet de transférer de l'énergie électrique du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, ce qui confère au système éolien un rendement élevé [11]. De plus, le facteur de puissance au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique peut également être imposé via le contrôle des puissances réactives dans les différentes commandes des convertisseurs.

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le CCM et le CCR, transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En effet, si nous considérons que la MADA fonctionne à puissance nominale pour un fonctionnement en mode hypersynchrone avec un glissement maximal égal à -30%, nous avons donc au maximum 25% de la puissance nominale de la machine transitant par les convertisseurs. Ceci permet de dimensionner les convertisseurs pour une puissance comprise entre 25 et 30% de la puissance nominale de la machine [29]. Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues/balais de la MADA est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs comparé à un système éolien pour lequel les convertisseurs seraient dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice.

Nous allons maintenant étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en modélisant les différents éléments de la chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne.

II.2.2 Modélisation du système éolien

Le schéma de l'éolienne basée sur une MADA connectée au réseau, incluant les différentes grandeurs mécaniques et électriques servant à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique, est illustré à la Figure II.7.

Dans un premier temps, nous présentons le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le fonctionnement de la MADA sera alors succinctement décrit, puis la MADA sera modélisée dans le repère de Park en vue de présenter la commande du CCM. Pour finir, la connexion du CCR au réseau électrique via le filtre RL sera également modélisée dans le repère de Park en vue de présenter la commande du CCR.

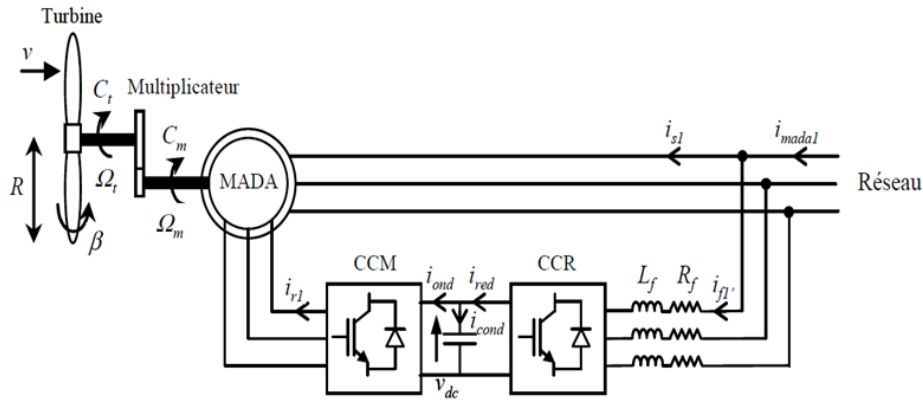


FIGURE II.7 – Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau.

II.2.2.1 Modèle de la turbine éolienne

Modèle aérodynamique Le vent de vitesse ν , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_t , s'exprimant par [20] :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot \nu^3 \quad (\text{II.9})$$

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{\nu} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- λ : la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.
- ρ : la masse volumique de l'air

- S :la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale.
- Ω_t :la vitesse de rotation de la turbine
- R :le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte en pratique [20].

Dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative et de l'angle de calage des pales dont l'expression a pour origine les travaux d'El Aïmani [17] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,35 - 0,00167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{14,34 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.11})$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\Pi}{2 \cdot \lambda} \cdot \rho \cdot R^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.12})$$

Modèle de la partie mécanique La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure II.8 dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée.

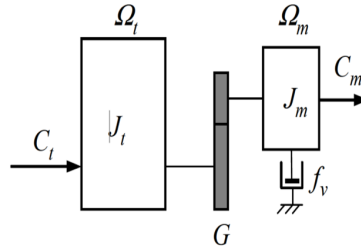


FIGURE II.8 – Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Avec :

- J_t :le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.
- J_m :le moment d'inertie de la MADA.
- f_v :le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA,
- C_m :le couple mécanique sur l'arbre de la MADA
- Ω_m :la vitesse de rotation de la MADA

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure II.8). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.13})$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.14})$$

D'après la Figure II.8, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

- C_{em} :le couple électromagnétique de la MADA

Le schéma bloc de la Figure II.9 correspond aux modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la MADA, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales, soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent ν est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

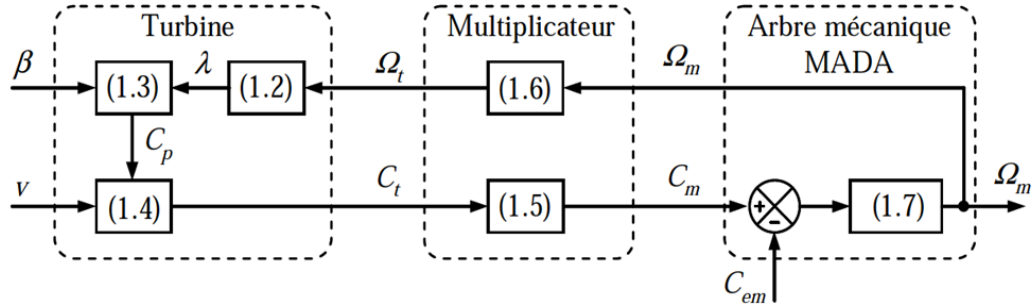


FIGURE II.9 – Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

II.2.2.2 Fonctionnement et modélisation de la MADA

Fonctionnement de la MADA La MADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bagues/balais. Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (*fem*) dans les enroulements rotoriques. Le rapport entre les *fems* créées au rotor et au stator est défini par [22] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - p \cdot \Omega_m}{\omega_s} = m \cdot \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- N_r et N_s : respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statorique
- p : le nombre de paires de pôles
- m : le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotoriques et statoriques,
- ω_s et ω_r : respectivement les pulsations statorique et électrique de la MADA

En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (\text{II.17})$$

L'équation (1.8) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot m \quad (\text{II.18})$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{1}{m} \quad (\text{II.19})$$

Donc, le rapport entre les puissances apparentes rotorique S_r et statorique S_s s'exprime par :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r}{i_s} = \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{II.20})$$

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la MADA en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g .

Modèle de la MADA dans le repère de Park Dans le but d'établir une commande vectorielle de la MADA, nous rappelons ici sa modélisation dans le repère de Park. Dans cette étude, nous ferons apparaître le rapport de transformation m dans les équations [8]. Le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

- entrefer constant
- effet des encoches négligé
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer
- influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante
- pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté

Ces choix signifient entre autres que les flux sont additifs, que les inductances propres sont constantes et qu'il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

Les équations des tensions statoriques et rotoriques de la MADA dans le repère de Park sont définies par [10], [22], [24], [44] :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \dot{\theta}_s \cdot \varphi_{sq} \quad (\text{II.21})$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \dot{\theta}_s \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{II.22})$$

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \dot{\theta}_r \cdot \varphi_{rq} \quad (\text{II.23})$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \dot{\theta}_r \cdot \varphi_{rd} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

- v_{sd} et v_{sq} :les tensions statoriques dans le repère de Park,
- v_{rd} et v_{rq} :les tensions rotoriques dans le repère de Park,
- i_{sd} et i_{sq} :les courants statoriques dans le repère de Park, :
- i_{rd} et i_{rq} :les courants rotoriques dans le repère de Park,
- φ_{sd} et φ_{sq} :les flux statoriques dans le repère de Park,
- φ_{rd} et φ_{rq} :les flux rotoriques dans le repère de Park,
- R_s et R_r :les résistances respectives des bobinages statorique et rotorique,
- θ_s et θ_r :les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les flux statoriques et rotoriques, en faisant apparaitre le rapport de transformation n , s'expriment par :

$$\varphi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + m \cdot L_m \cdot i_{rd} \quad (\text{II.25})$$

$$\varphi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + m \cdot L_m \cdot i_{rq} \quad (\text{II.26})$$

$$\varphi_{rd} = L_s \cdot i_{rd} + m \cdot L_m \cdot i_{sd} \quad (\text{II.27})$$

$$\varphi_{rq} = L_s \cdot i_{rq} + m \cdot L_m \cdot i_{sq} \quad (\text{II.28})$$

Où :

$$L_s = L_{fs} + L_m \quad (\text{II.29})$$

$$L_r = L_{fr} + m^2 \cdot L_m \quad (\text{II.30})$$

Avec :

- L_s :l'inductance cyclique statorique,
- L_r :l'inductance cyclique rotorique,
- L_m :l'inductance magnétisante,
- L_{fs} :l'inductance de fuite statorique,
- L_{fr} :l'inductance de fuite rotorique.

Les angles de Park relatifs aux grandeurs statoriques et rotoriques sont liés, d'après la Figure II.13, par la relation :

$$\theta_s = \theta_e + \theta_r \quad (\text{II.31})$$

Avec :

- θ_e :l'angle électrique entre les bobinages statorique et rotorique.

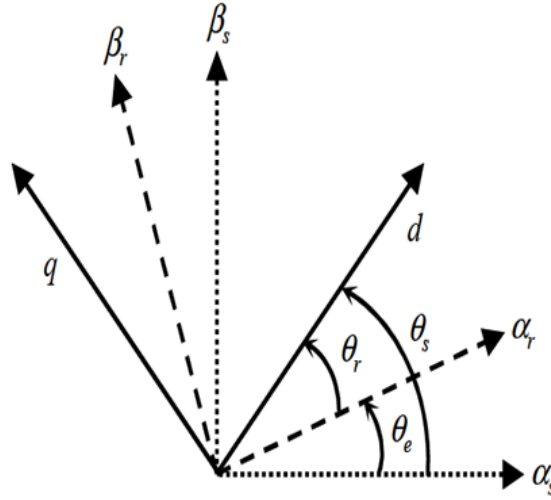


FIGURE II.10 – Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par :

$$P_s = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \quad (\text{II.32})$$

$$Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \quad (\text{II.33})$$

$$P_r = v_{rd} \cdot i_{rd} + v_{rq} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.34})$$

$$Q_r = v_{rq} \cdot i_{rd} - v_{rd} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.35})$$

Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (\text{II.36})$$

Il peut également s'exprimer en fonction des courants rotoriques et des flux statoriques par :

$$C_{em} = p \cdot \frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot \varphi_{sq} \cdot i_{rd} - \varphi_{sd} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.37})$$

II.3 Modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La Figure II.11 illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique, constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée.

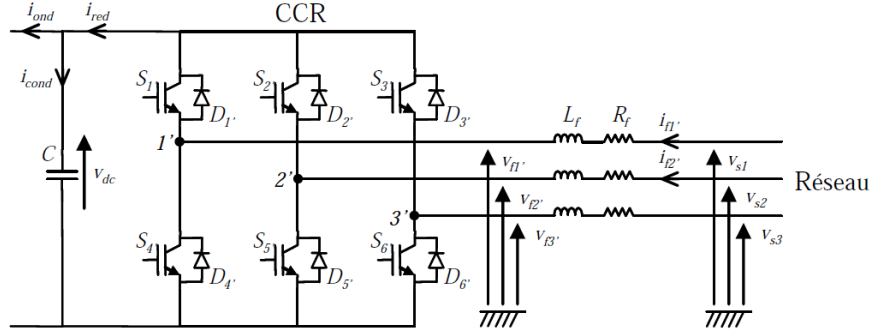


FIGURE II.11 – Connexion du CCR au réseau électrique.

Avec :

- i_{ond} , i_{red} : respectivement les courants modulés par le hacheur, le CCM et le CCR,
- i_{cond} : le courant traversant le condensateur,
- v_{dc} : la tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur),
- S_i , D_i : respectivement les transistors IGBT et les diodes connectées en antiparallèle
- R_f et L_f : respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL,
- v_{fk} : les tensions simples modulées par le CCR
- v_{sk} : les tensions simples du réseau électrique,
- i_{f1} , i_{f2} : les courants circulant à travers le filtre RL.

II.3.1 Modélisation du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{cond} \quad (\text{II.38})$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un noeud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et de l'autre coté des deux générateurs :

$$i_{cond} = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{II.39})$$

II.3.2 Modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park

D'après la Figure II.11, nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes :

$$v_{f1} = -R_f \cdot i_{f1} - L_f \frac{di_{f1}}{dt} + v_{s1} \quad (\text{II.40})$$

$$v_{f2} = -R_f \cdot i_{f2} - L_f \frac{di_{f2}}{dt} + v_{s2} \quad (\text{II.41})$$

$$v_{f3} = -R_f \cdot i_{f3} - L_f \frac{di_{f3}}{dt} + v_{s3} \quad (\text{II.42})$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$v_{fd} = -R_f \cdot i_{fd} - L_f \frac{di_{fd}}{dt} + \dot{\theta}_s \cdot L_f \cdot i_{fq} + v_{sd} \quad (\text{II.43})$$

$$v_{fq} = -R_f \cdot i_{fq} - L_f \frac{di_{fq}}{dt} - \dot{\theta}_s \cdot L_f \cdot i_{fd} + v_{sq} \quad (\text{II.44})$$

II.4 Modélisation des composants d'électronique de puissance

Dans un bâtiment 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.

II.4.1 Modélisation du hacheur

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.

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...) [6]. 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, et le FORWARD.

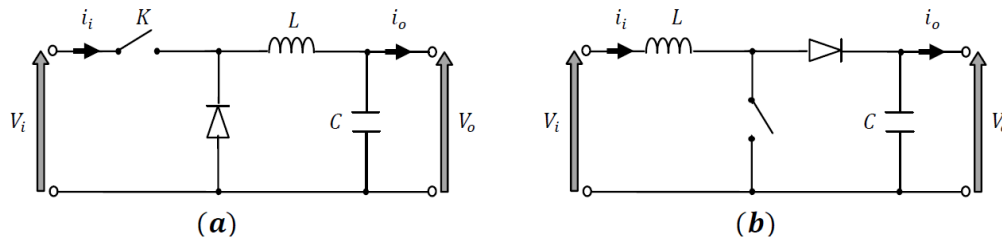


FIGURE II.12 – Schéma de principe d'un hacheur : (a) abaisseur (b) éleveur

II.4.2 Modélisation de l'onduleur

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 [16].

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.

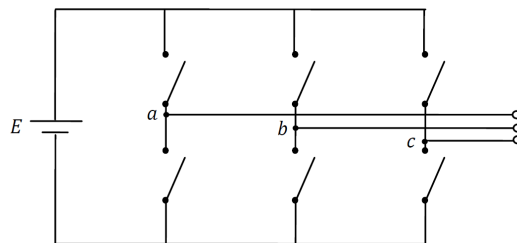


FIGURE II.13 – Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension

II.4.3 Modélisation du redresseur

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 [34].

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 [6] :

- 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 [6] :

1. P_q : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;
2. PD_q : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;
3. S_q : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

La figure II.14 donne le schéma électrique des montages P_3 , PD_3 et S_3 . Ces trois montages sont le plus communément utilisés pour le redressement de tensions triphasées.

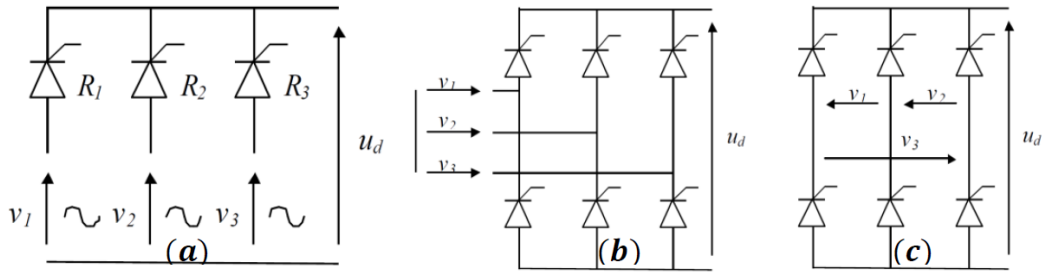


FIGURE II.14 – Redresseurs triphasés : (a) P_3 , (b) PD_3 , (c) S_3

Dans cette première partie, nous avons développé les modèles de la chaîne photovoltaïque, de la turbine, de la MADA et de la connexion du CCR avec le réseau électrique. Dans la partie suivante, nous allons nous intéresser au dispositif de commande du système Hybride.

Chapitre III

Commande des Générateurs d'Énergie Renouvelables

III.1 Commande et optimisation du générateur photovoltaïque

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet pour un générateur photovoltaïque la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé.

Comme nous pouvons le constater sur la figure III.1, pour la charge résistive de différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement, nommé maximum power point, il est noté dans notre cas MPP. Il correspond à la puissance maximale que peut délivrer le générateur PV pour une courbe $I=f(V)$ donnée.

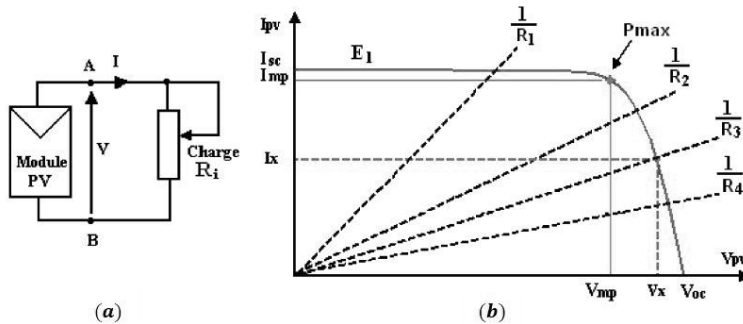


FIGURE III.1 – (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge. (b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous des conditions climatiques fixes avec une charge résistive variable (R_1, R_2, R_3, R_4) [50]

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance que peut délivrer le générateur PV, on utilise alors un étage d'adaptation entre ce dernier et la charge, on utilisera dans notre cas le convertisseur DC/DC buck-boost comme le montre la figure III.2 .

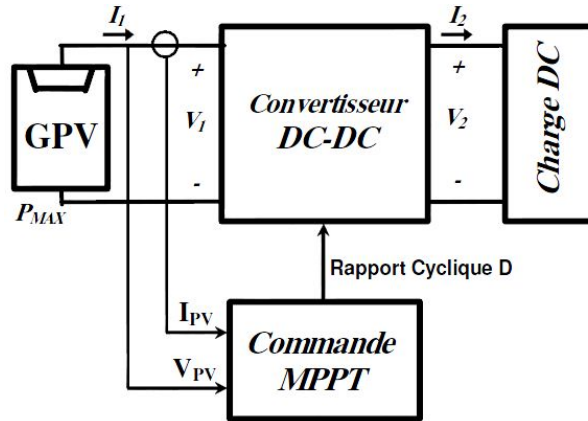


FIGURE III.2 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d’un convertisseur DC-DC [23]

Plusieurs techniques de recherche du point de puissance maximale ou MPPT (Maximum Power Point Tracking) ont été développées afin d’assurer un transfert optimal de la puissance vers la charge. On peut les classer en :

Méthodes à contre réaction de tension : Elles se basent 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} ($V_{mpp} = KV_{oc}$ ou K est un coefficient généralement entre 0.70 et 0.82[48]), 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 connaître la valeur du courant optimal qui correspond au fonctionnement à puissance maximale du générateur. Le courant optimal est proportionnel au courant de court-circuit ($I_{mpp} = KI_{oc}$ ou K est un coefficient proche de 0.86 [48]).

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. Parmi ces méthodes on cite les algorithmes perturb and observe (P&O) et conductance incrémentale.

Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT : elles se basent sur les techniques intelligentes nouvellement introduites dans le domaine des MPPT. IL s’agit

des réseaux de neurones et de la logique floue.

III.1.1 MPPT par l'algorithme perturb and Observe

III.1.1.1 Principe

C'est l'un des algorithmes les plus utilisés pour la poursuite du point de puissance maximale pour sa facilité d'implémentation [15], il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou on agit directement sur un paramètre de réglage (rapport cyclique) puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du générateur. Si la valeur de la puissance $P(k)$ est supérieure à la précédente $P(k-1)$, on garde alors la même direction de perturbation sinon on inverse le sens de la perturbation comme le montre la figure III.3.

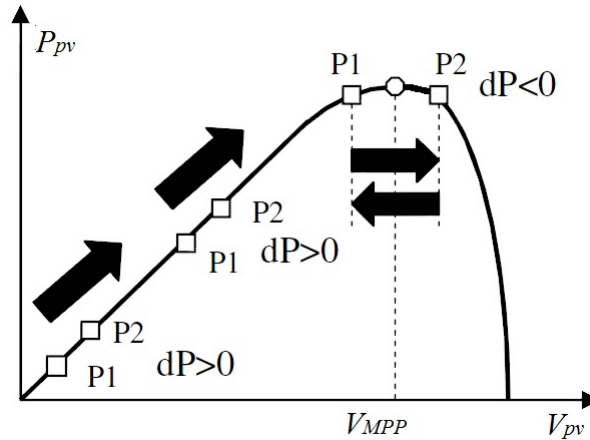


FIGURE III.3 – Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O

L'algorithme étant basé sur la perturbation de la tension, il y aura toujours des oscillations même si le point de puissance maximale est atteint. La figure III.4 décrit le fonctionnement de l'algorithme P&O.

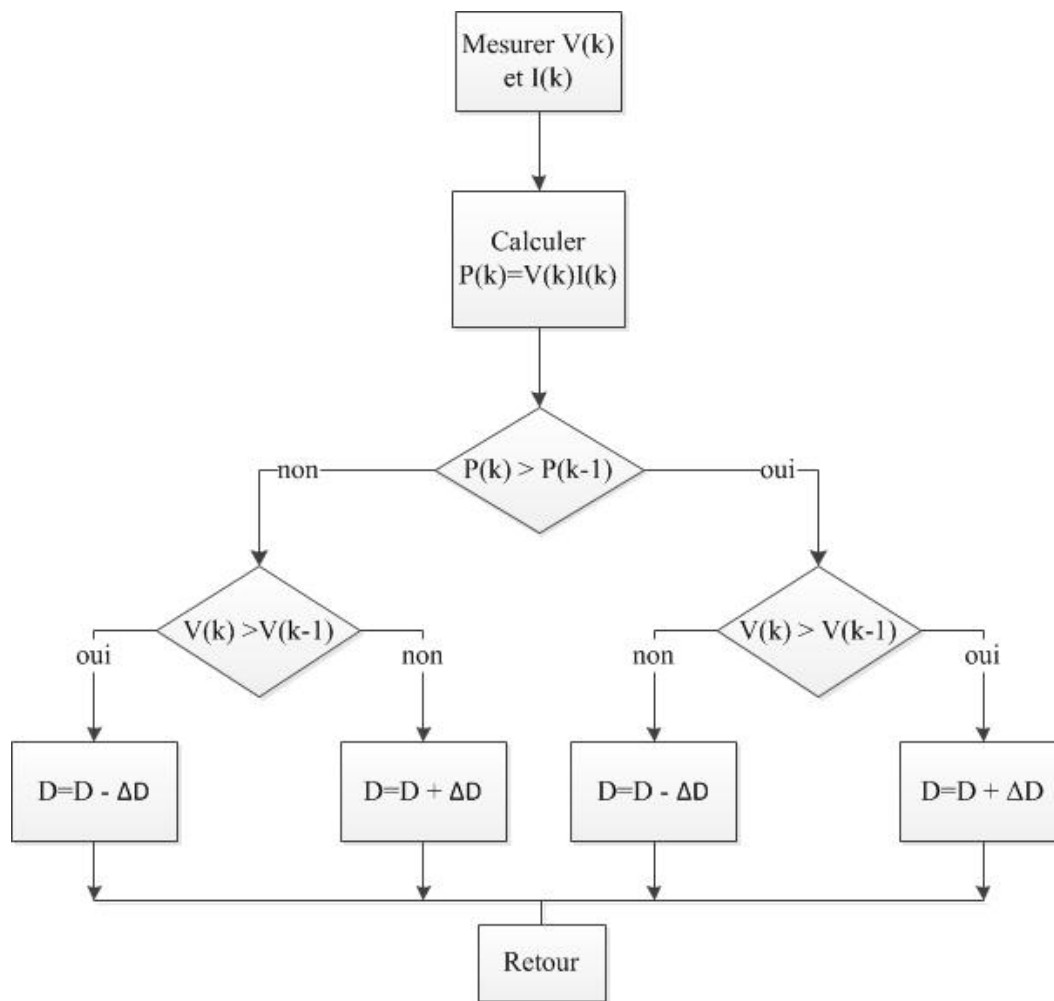


FIGURE III.4 – L’organigramme de l’algorithme perturb and observe

III.1.2 MPPT par logique floue

III.1.2.1 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[7].

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. Grace 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[9].

III.1.2.2 Terminologie de la logique floue

Variable linguistique La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues (quelques, 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[9].

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. Elle peut être monotone, triangulaire, trapézoïdale, ou en forme de cloche comme le montre la figure III.5.

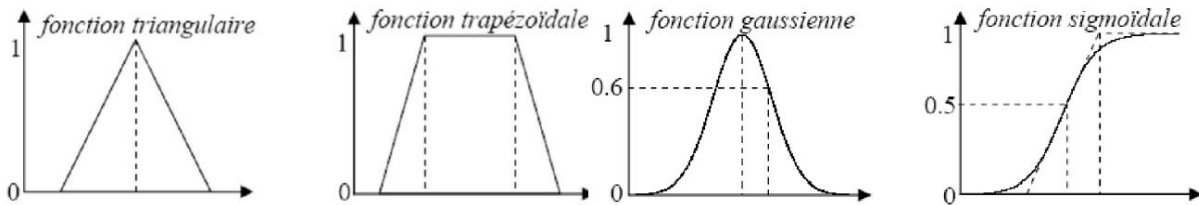


FIGURE III.5 – Fonctions d'appartenances

Univers de discours et classes d'appartenances Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'ensemble des prédicats peut être caractérisé par plusieurs sous-ensembles flous. Chaque sous ensemble flou dans l'univers de discours représente une valeur linguistique.

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.1.2.3 Structure de base d'un contrôleur flou

La structure conventionnelle d'un contrôleur flou est représentée dans la figure III.6. Elle est composée de quatre blocs.

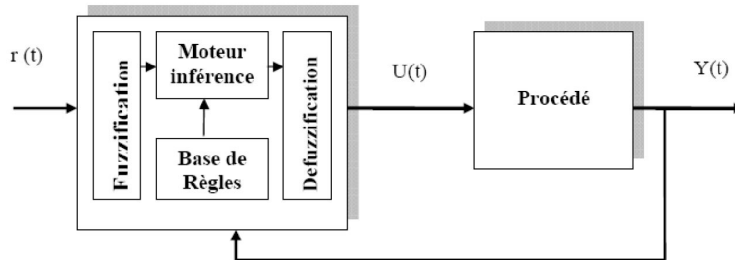


FIGURE III.6 – Structure d'un contrôleur flou[33]

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[7].

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 a 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[18].

Deux types de règles floues existent :

- **Les règles de Mamdani** : ou 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) ou : $u_1 \dots x_n$ sont les variables d'entrees, $u_1 \dots u_m$ 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 ($u_1 = f_1(x_1 \dots x_n)$), ($u_2 = f_2(x_1 \dots x_n)$), ..., ($u_m = f_m(x_1 \dots x_n)$) Les fonctions f_1, f_2, \dots, f_m sont des fonctions réelles, elles peuvent être linéaires ou non linéaires.

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" [18]. 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 :

| | | | | |
|-----|------------|---|---|---|
| | Δe | N | Z | P |
| e | | N | Z | P |
| | N | P | P | Z |
| | Z | P | Z | N |
| | P | Z | N | N |

TABLE III.1 – Exemple d'une table d'inférence

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

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 [7].

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.

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

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.1.2.4 Application de la logique floue pour la recherche du MPP

Les régulateurs flous ont été récemment utilisés dans la recherche du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques et éoliens. Ils ont l'avantage d'être robustes et relativement simple à concevoir car ils n'exigent pas la connaissance du modèle exact. D'un autre côté, ils exigent la connaissance parfaite et complète du système PV par l'opérateur pour l'établissement des règles d'inférences. Les deux variables d'entrée du contrôleur flou sont l'erreur E et la variation de l'erreur dE prélevée à

chaque pas d'échantillonnage k . Ces deux variables sont définies par les deux expressions suivantes :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{III.2})$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III.3})$$

ou $P(k)$ est la puissance délivrée par le générateur PV et $V(k)$ la tension aux bornes du générateur. Ces grandeurs sont calculées à partir de la mesure du courant et de la tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

$E(k)$ montre si le point de fonctionnement pour la charge utilisée à l'instant k se situe du côté gauche ou du côté droit du point maximum de puissance maximale sur la caractéristique de la courbe $P = f(V)$ comme le montre la figure III.7.

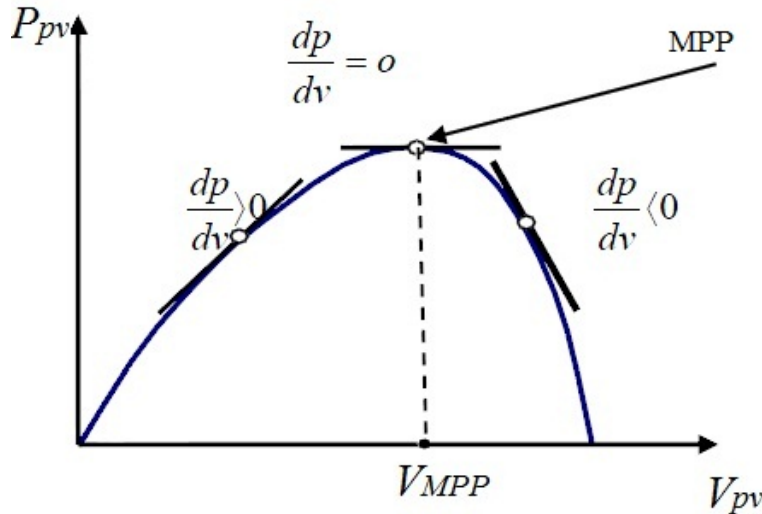


FIGURE III.7 – Signe de $E(k) = \frac{dP}{dV}$ indiquant la position du MPP

- Si $E(k)$ est nul, le point de fonctionnement est au point de puissance maximale.
- Le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale si $E(k)$ est positif.
- Le point de fonctionnement est à droite du point de puissance maximal si $E(k)$ est négatif.

Alors que $\Delta E(k)$ exprime le sens de déplacement de ce point.

Il faudra donc augmenter la tension quand le point de point de fonctionnement se situe à gauche du MPP et diminuer la tension dans le cas contraire sachant que pour augmenter la tension il suffira juste d'augmenter le rapport cyclique du hacheur Buck-Boost et vice-versa.

L'univers de discours est alors divisé en 5 sous ensembles flous étiquetés comme suit
 NB :Negative Big,NS :Negative Small,Z :Zero,PS :Positive Small,PB :Positive Big

Les deux variables d'entrées seront traduites en variables linguistiques selon les fonctions d'appartenance aux sous ensembles flous de la figure III.8 et III.9

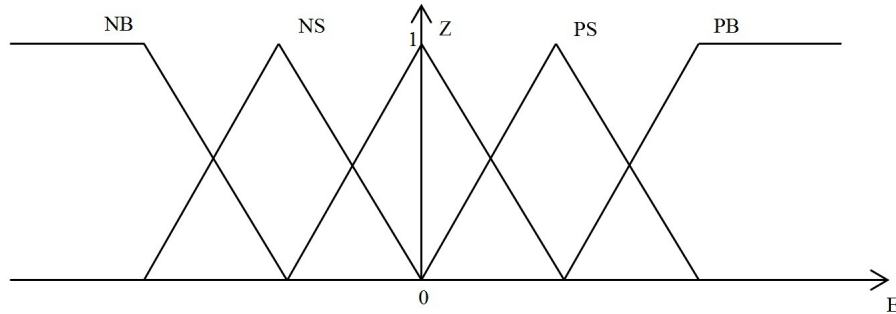


FIGURE III.8 – Fonctions d'appartenance de l'entrée E

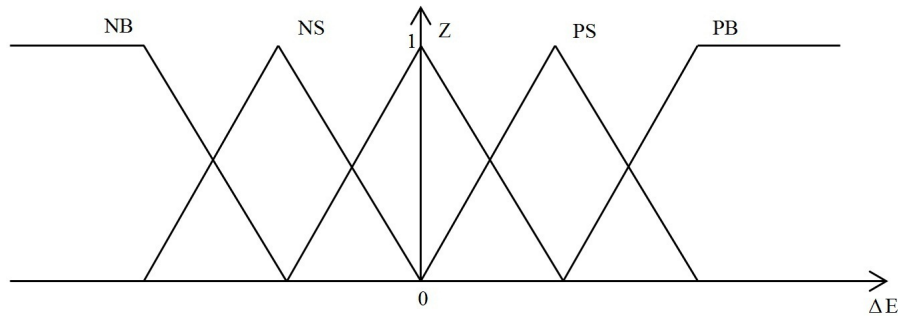


FIGURE III.9 – Fonctions d'appartenance de l'entrée ΔE

Quant à la la sortie du régulateur flou c la méthode du centre de gravité qui a été choisie (controlleur flou de type Mamdani) pour calculer le rapport cyclique D du convertisseur DC-DC

La defuzzification est faite suivant les fonctions d'appartenance des sous ensembles flous de la figure III.10

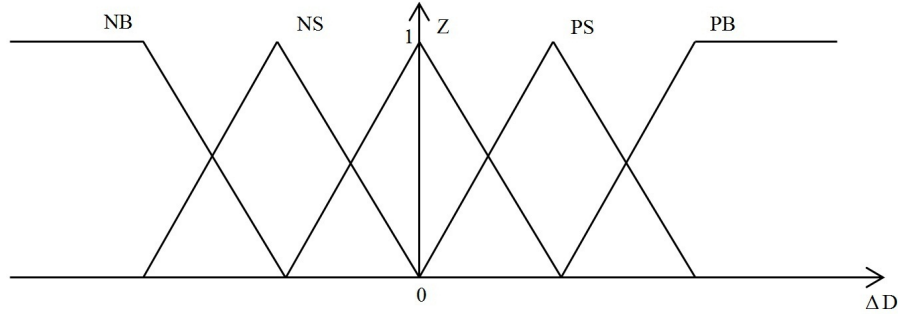


FIGURE III.10 – Fonctions d'appartenance de la sortie ΔD

La table III.2 représente la matrice d'inférence du contrôleur flou, elle est synthétisée de sorte à annuler l'erreur $E(k)$

| $E \backslash \Delta E$ | NB | NS | Z | PS | PB |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| NB | Z | Z | NB | NB | NB |
| NS | Z | Z | NS | NS | NS |
| Z | NS | Z | Z | Z | PS |
| PS | PS | PS | PS | Z | Z |
| PB | PB | PB | PB | Z | Z |

TABLE III.2 – Table de la base des règles floues

III.1.3 MPPT par réseau de neurones

III.1.3.1 Les réseaux de neurones

Le cerveau humain est un réseau de neurones biologique très complexe. Il comprend des milliards de neurones hautement interconnectés entre eux, permettant entre autres le processus de la respiration, des mouvements et de la pensée. Les scientifiques commencent juste à comprendre le fonctionnement du cerveau. On sait maintenant que toutes les fonctions neurologiques biologiques, comme la mémoire, sont emmagasinées dans les neurones et dans les interconnexions entre eux, L'apprentissage est vu comme l'établissement de nouvelles connexions entre les neurones ou dans les modifications entre ses interconnexions [32]. Le terme réseaux de neurones 'formels' ou 'artificiels' fait rêver certains, et fait peur à d'autres. La vérité est à la fois plus prosaïque et plus rassurante, les réseaux de neurones constituent une technique de traitement de données bien comprise et maîtrisée, ils sont utilisés pour faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux [14].

Historique Les premiers travaux sur les neurones artificiels ont débuté au début des années 1940 et ont été mémés par McCulloh et Pitts. Ils décrivent les propriétés du système nerveux à partir de neurones idéalisés : ce sont des neurones logiques (0 ou 1). Dix années plus tard, on a constitué le premier modèle réel d'un réseau de neurones. En 1960, le premier perceptron est créé par Rosenblatt. Puis, durant les années 1970 il y eut une remise en cause de l'intérêt des réseaux de neurones car les ordinateurs apprenaient lentement, coûtaient très cher et leurs performances n'étaient pas si impressionnantes [12]. La disponibilité croissante de minis et microordinateurs, vers la fin des années 1970, a permis aux réseaux de neurones de prendre départ. On attribue à Hopfield (un physicien de Caltech) un rôle majeur dans cette résurrection [40].

Neurone biologique Le neurone biologique comme le montre la figure III.11 est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie [40].

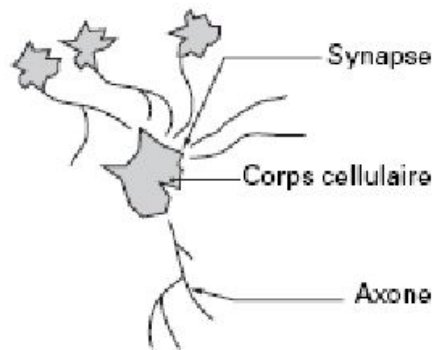


FIGURE III.11 – Neurone biologique[40]

Neurone artificiel Un neurone artificiel est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeur bornée [14]. C'est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrée en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire (neurone) est doté d'une sortie unique, qui se ramifie pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. A chaque connexion d'entrée est associé un poids [40].

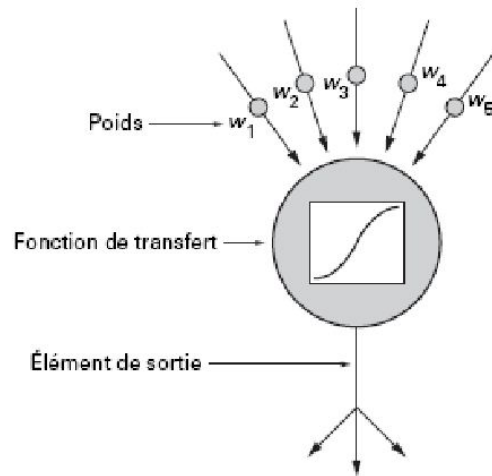


FIGURE III.12 – Neurone artificiel[40]

Les variables sur lesquelles opère le neurone artificiel sont habituellement désignées sous le terme d'entrées du neurone. Et la valeur de sortie sous celui de sortie; il est commode de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure III.12. Cette représentation est le reflet de l'inspiration biologique qui été à l'origine de la première vague d'intérêt pour les neurones formels, dans les années 1940 à 1970 [14].

Modélisation d'un neurone artificiel Le neurone artificiel (formel) est modélisé par deux opérateurs comme le montrent les figures III.13 et III.14, un opérateur de sommation en entrée, suivi d'un opérateur non linéaire (fonction d'activation). C'est l'association de tels éléments simples sous la forme de réseaux qui permet de réaliser des fonctions utiles pour des applications industrielles [5].

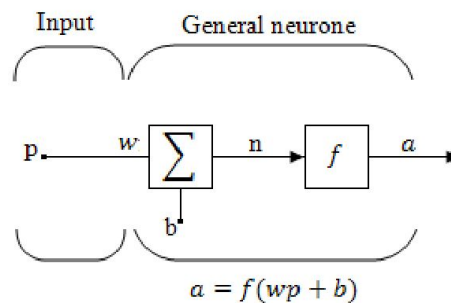


FIGURE III.13 – Single-Input Neurone [19]

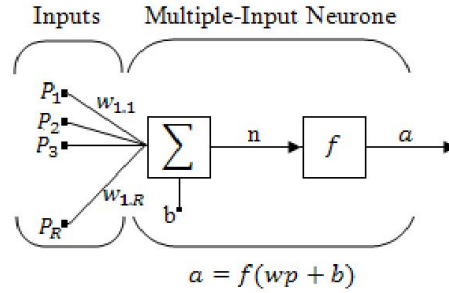


FIGURE III.14 – Multiple-Input Neurone [19]

La sortie du neurone est donnée par $a = f(wp + b)$. w et b sont des paramètres ajustable et la fonction de transfert est choisi par le concepteur [5].

Il existe plusieurs types de fonction d'activation selon l'application à laquelle est dédié le réseau de neurones et aussi les contraintes relatives aux algorithmes d'apprentissage [12].

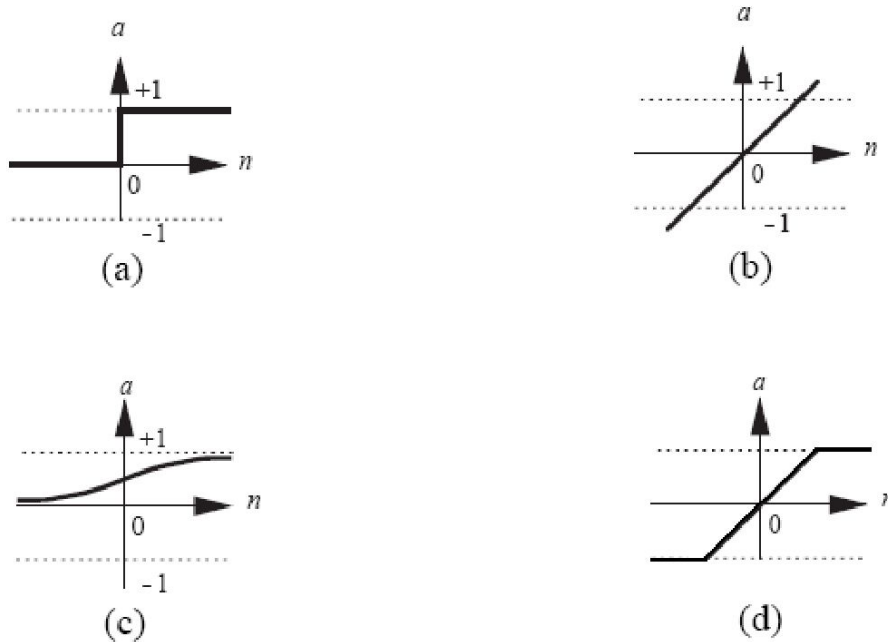


FIGURE III.15 – Fonctions d'activation [19].(a)fonction Heaviside (b)fonction linéaire (c)fonction linéaire à seuil (d)fonction sigmoïde

La fonction de transfert Log-Sigmoïde est souvent utilisée dans les réseaux à multicouches, entraînés par la méthode de rétropropagation du fait qu'elle est différentiable [19].

Les réseaux de neurones Un neurone réalise simplement une fonction non linéaire, paramétrée, de ses variables d'entrées. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non linéaires réalisée par chacune des neurones [14]. Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la « topologie » du modèle. Le plus souvent, cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones [40].

Réseau multicouche Les neurones sont arrangés par couche. On place ensuite bout à bout plusieurs couches et l'on connecte les neurones de deux couches adjacentes. Les entrées des neurones de la deuxième couche sont en fait les sorties des neurones de la couche amont. Les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent le vecteur d'entrée [40].

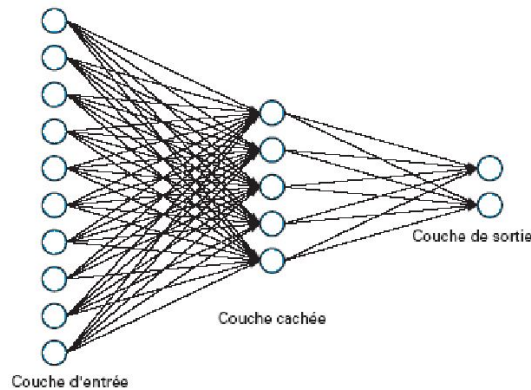


FIGURE III.16 – Réseaux multicouche [40]

Réseau à connexions locales C'est aussi un réseau multicouche, mais tous les neurones d'une couche amont ne sont pas connectés à tous les neurones de la couche aval. Nous avons donc dans ce type de réseau de neurones un nombre de connexions moins important que dans le cas du réseau de neurones multicouche classique [40].

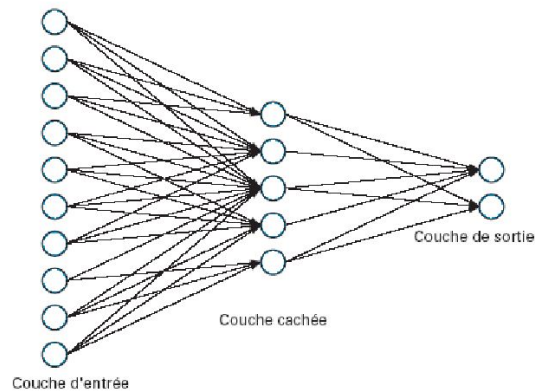


FIGURE III.17 – Réseau à connexions locales [40]

Réseau à connexions récurrentes Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche [40].

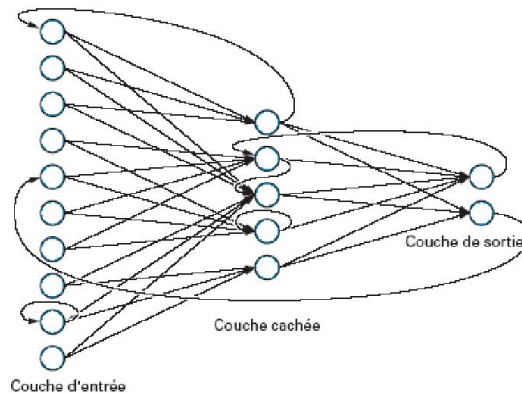


FIGURE III.18 – Réseau à connexions récurrentes [40]

Réseau à connexions complexes Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau y compris lui-même, c'est la structure d'interconnexion la plus générale [40].

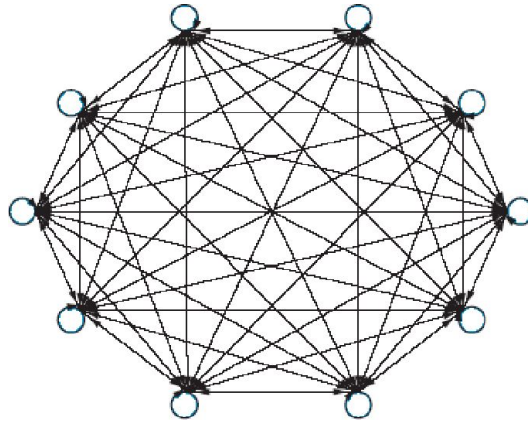


FIGURE III.19 – Réseau à connexion complexe [40]

Apprentissage des réseaux de neurones On appelle apprentissage des réseaux de neurones la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée [14].

Apprentissage supervisé L'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée). Tout le problème de l'apprentissage supervisé consiste, à déterminer le vecteur des poids w d'un réseau capable de mettre ces informations en correspondance [40].

Apprentissage non supervisé L'apprentissage est qualifié de non supervisé lorsque seules les valeurs d'entrées sont disponibles. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sorties qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrées similaires (de même nature) [40].

Surapprentissage Les travaux expérimentaux menés sur les réseaux de neurones ont montré que, si on dépasse un certain nombre d'exemples d'entraînement, le réseau peut perdre sa capacité de généralisation, et donner ainsi des sorties non satisfaisantes pour de nouvelles entrées, c'est ce qu'on appelle le surapprentissage.

Algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones La phase d'apprentissage est une étape déterminante dans la conception du réseau de neurones. Pour cela, des algorithmes appropriés ont été élaborés et développés, chacun de ces algorithmes est spécifique à un type de réseau.

Algorithme de rétropropagation (Back-propagation) Cet algorithme est appliqué au réseau de neurone de la manière suivante : le réseau est stimulé par un vecteur d'entrée. L'information se propage à travers les couches cachées. La sortie du réseau est

recueillie et comparée à une réponse désirée. Ensuite les poids synaptiques sont modifiés par rétropropagation de l'erreur. Le terme rétropropagation provient du fait que l'erreur calculée en sortie est transmise en sens inverse vers l'entrée. Cet apprentissage est du type supervisé. La quantité à minimisée, à chaque pas d'apprentissage k , est la variance de l'erreur de sortie du réseau [27].

Algorithme Fast Back-propagation L'un des inconvénients de l'apprentissage des réseaux de neurones sur ordinateurs, est le temps énorme que met le réseau pour converger vers une performance acceptable. Ceci a poussé les chercheurs à trouver d'autres alternatives d'algorithmes rapides et efficaces. Parmi elles, figure l'algorithme Fast Back-propagation. Le principe d'apprentissage dans cet algorithme est identique à celui de la Backpropagation, la différence réside dans le changement de la fonction à minimiser en vu d'accélérer la convergence après la première itération.

Algorithme Random Optimisation Methode (ROM) C'est une méthode d'optimisation basée sur des techniques aléatoires utilisée pour retrouver l'extremum d'une fonction et adaptée à l'apprentissage des réseaux de neurones.

Application des réseaux de neurones dans le contrôle Une des applications des réseaux de neurones, est l'approximation des fonctions complexes, comme illustré dans la figure III.20, les paramètres du réseau sont modifiés afin que le réseau reproduise parfaitement la dynamique de la fonction à approximer. Dans notre cas cette fonction représente la relation qui existe entre les conditions météorologiques et la fréquence à laquelle doit fonctionner le moteur.

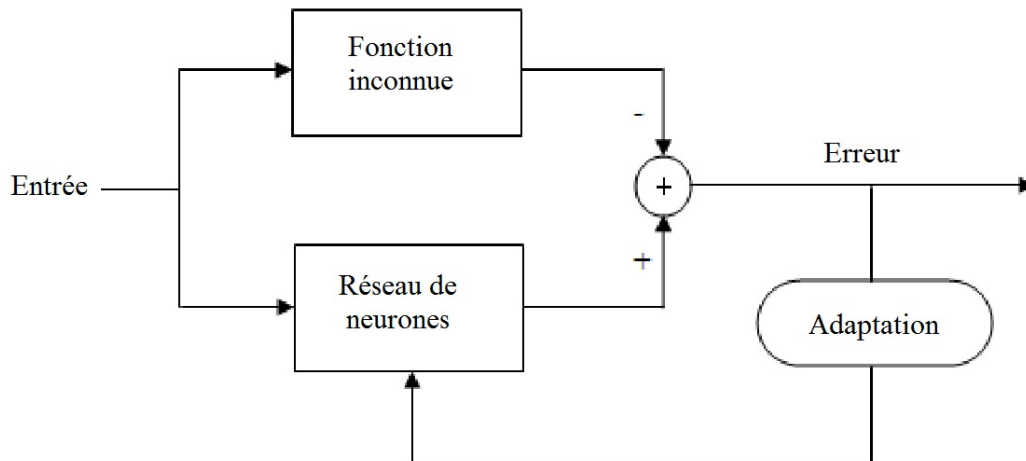


FIGURE III.20 – Réseau de neurones approximateur

A la fin de l'entraînement du réseau nous aurons un bloc qui permettra de poursuivre le point de puissance maximale en fonctions des conditions météorologiques.

Elaboration d'un bon réseau La conception d'un réseau impose le choix de beaucoup de paramètres. Les sections suivantes détaillent les principales étapes de conception [32].

Première étape : les variables d'entrées La première étape consiste à déterminer les variables d'entrées du réseau. Celles-ci doivent avoir une influence (ou relation) avec la sortie désirée.

Deuxième étape : choix de la structure Maintenant que le choix des variables d'entrée est fait, il est possible de s'intéresser à l'architecture du réseau. Combien de couches cachées sont nécessaires ? Combien de neurones faut-il inclure dans ces couches cachées ? Quel sont les relations qui doivent relier les différentes couches ?

Troisième étape : l'entraînement L'entraînement du réseau est l'étape cruciale de tout le processus. C'est à ce moment que se développe la précision et la robustesse de celui-ci. Pour faire un bon entraînement, certaines conditions doivent être respectées.

La première condition concerne les données d'entraînement. Il faut que celles-ci représentent bien la plage d'utilisation du procédé. La deuxième condition concerne la sur spécialisation du réseau. Il peut arriver, sous certaines conditions, que le réseau se spécialise sur les données d'entraînement, au dépend de la généralisation. Finalement, pour s'assurer que l'entraînement du réseau est bien fait, il faut réserver une partie des données expérimentales qui serviront uniquement à la validation du réseau.

III.1.3.2 Utilisation des réseaux de neurones pour la recherche du MPP

Cette méthode est différente des autres. En effet, entraîné au préalable à l'aide d'une base de données, le réseau de neurones pourra asservir la tension du générateur à une tension de référence égale à la tension au point de puissance maximale selon les conditions météorologiques que sont la température et l'éclairement solaire.

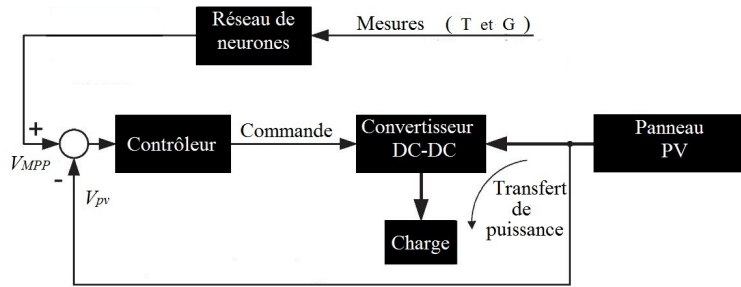


FIGURE III.21 – schéma de commande par réseau de neurones

Le schéma synoptique de la commande est suivant la figure III.21, la tension de consigne V_{ref} est comparée avec la tension mesurée V_{pv} du générateur solaire, le signal d'erreur est ensuite utilisé pour commander le convertisseur DC-DC.

Le réseau utilisé pour adapter la tension est un réseau multicouche composé de trois couches, une couche d'entrée, une couche de sortie et une couche cachée de 13 neurones, la méthode de LEVENBERG-MARQUARDT est un standard pour l'optimisation de l'erreur quadratique due à ses propriétés de convergence rapide et de robustesse, elle a donc été utilisée pour entraîner le réseaux de neurones.

La base de données a été générée à partir du modèle mathématique du panneau PV utilisé, un maillage uniforme de 100 points a été effectué sur une variation de la température de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de 0 à 1500 W/m^2 .

III.2 Commande du système éolien

III.2.1 Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure III.22. Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.

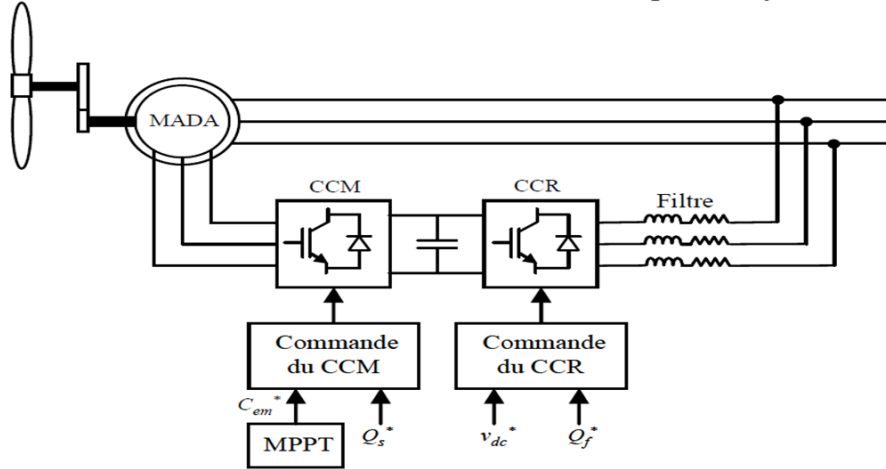


FIGURE III.22 – Architecture de commande du système éolien.

D'après la Figure III.22, trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit "MPPT" (Maximum Power Point Tracking),
- la commande du CCM en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive statorique de la MADA,
- la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

III.2.2 Extraction du maximum de la puissance du vent

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la Figure III.23 [35] :

- Zone 1 : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro,
- Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale v_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à

- ce que le vent atteint la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n ,
- Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale v_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

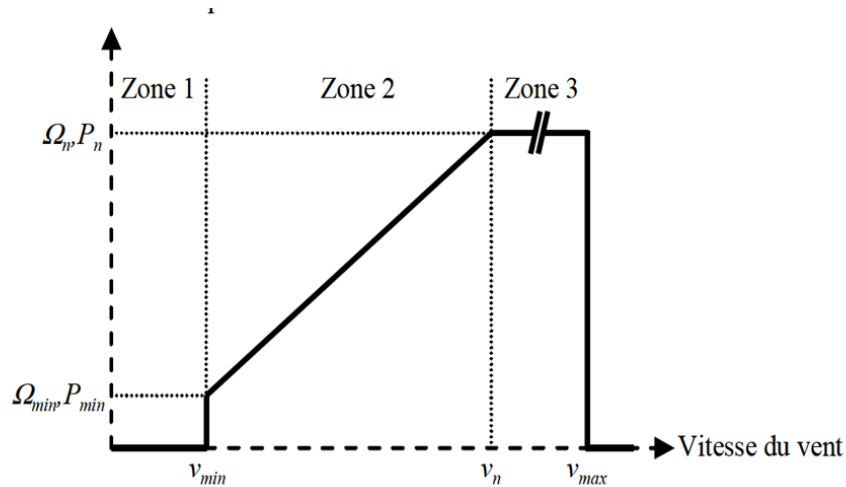


FIGURE III.23 – Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Texte

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales est constant. Un fonctionnement en zone 3 aurait uniquement pour conséquence une modification de cet angle afin de limiter la puissance mécanique pour éviter toute destruction de l'éolienne. Une modélisation et une commande du système d'orientation des pales seraient alors nécessaires sachant que les commandes du CCM et du CCR resteraient les mêmes pour les zones 2 et 3. Or, notre travail porte davantage sur les commandes des grandeurs électriques ainsi le système d'orientation des pales permettant de dégrader le rendement aérodynamique de l'éolienne ne sera alors pas étudié dans ce manuscrit.

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [37] :

- le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation,
- le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la MADA et le CCM sont idéaux : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la MADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

III.2.2.1 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

La première méthode de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la MADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué, comme le montre la Figure . Le couple électromagnétique de référence C_{em}^* permettant d'obtenir une vitesse de rotation Ω_m égale à sa valeur de référence Ω_m^* est obtenu en sortie du régulateur de vitesse ("Reg" sur la Figure III.24). Ce régulateur, de type Proportionnel Intégral (*PI*), permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple mécanique C_m considéré comme une perturbation.

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient C_p . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} (pour constant et égal à 2°), comme le montre la Figure III.25.

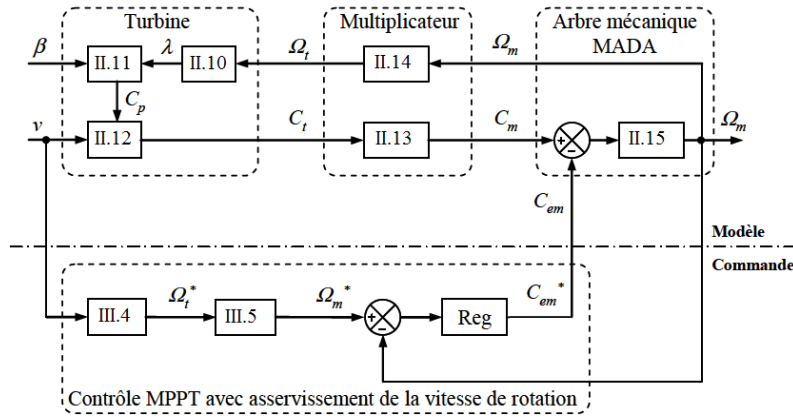
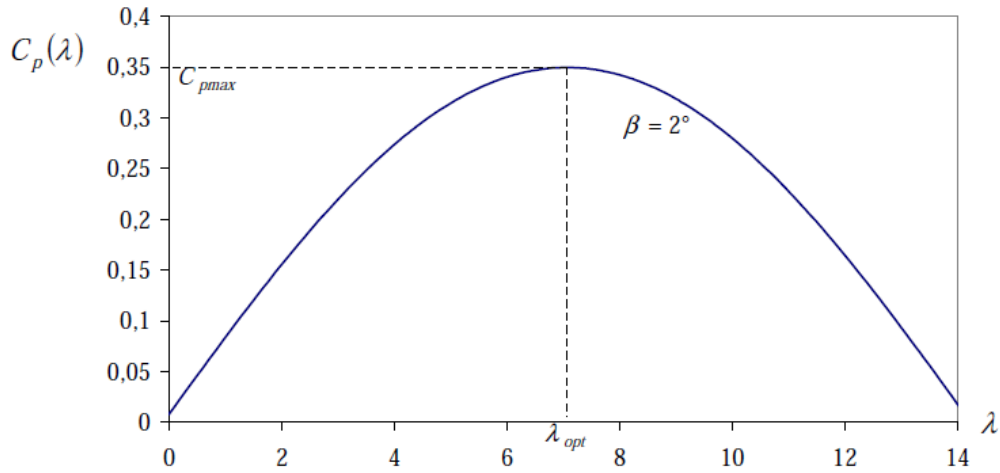


FIGURE III.24 – Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.


 FIGURE III.25 – Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$.

La vitesse de rotation de référence de la turbine Ω_t^* est obtenue à partir de l'équation (II.10) et est définie par :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \quad (\text{III.4})$$

Nous en déduisons la référence de vitesse de rotation de la MADA en prenant en compte le gain du multiplicateur par :

$$\Omega_m^* = G \cdot \Omega_t^* \quad (\text{III.5})$$

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation. Ce mode de contrôle est étudié à la section suivante. Il sera retenu dans la suite de nos travaux.

III.2.2.2 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation (II.15), nous pouvons écrire :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} = 0 \quad (\text{III.6})$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux (f_v) par rapport au couple mécanique C_m , on peut alors écrire :

$$C_m = C_{em} \quad (\text{III.7})$$

La Figure III.26 présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

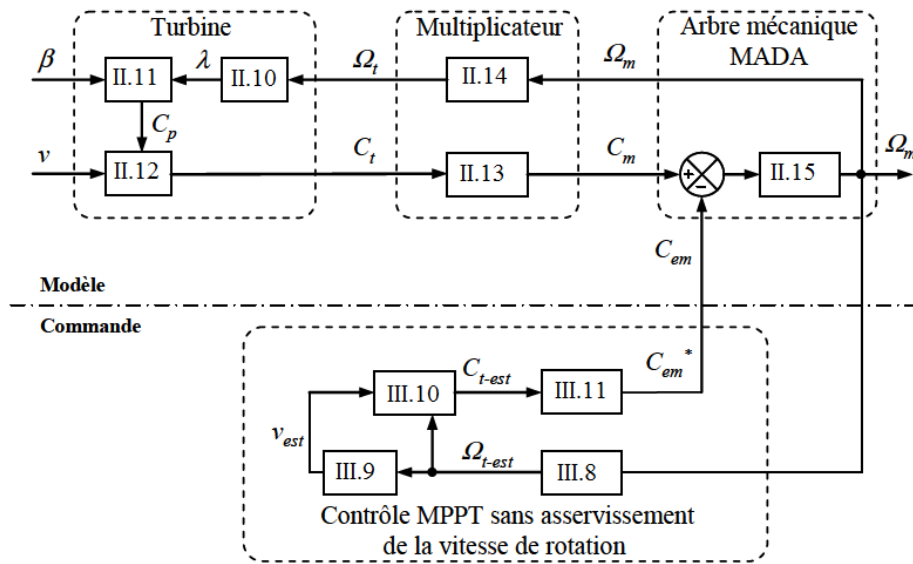


FIGURE III.26 – Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée Ω_{t-est} , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_m}{G} \quad (III.8)$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée ν_{est} , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$\nu_{est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R}{\lambda} \quad (III.9)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$C_{t-est} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{t-est}} \cdot \nu_{est}^3 \quad (III.10)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$C_{em}^* = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (III.11)$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum C_{pmax} . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par :

$$C_{em}^* = K \cdot \Omega_m^2 \quad (III.12)$$

Où K est une constante définie par :

$$K = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (III.13)$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (Zone 2) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la MADA.

III.2.3 Commande du convertisseur côté MADA

Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande du CCM dont le principe est illustré à la Figure 1-12.

Les contrôles du couple électromagnétique et de la puissance réactive statorique seront obtenus en contrôlant les courants rotorique d'axes dq de la MADA.

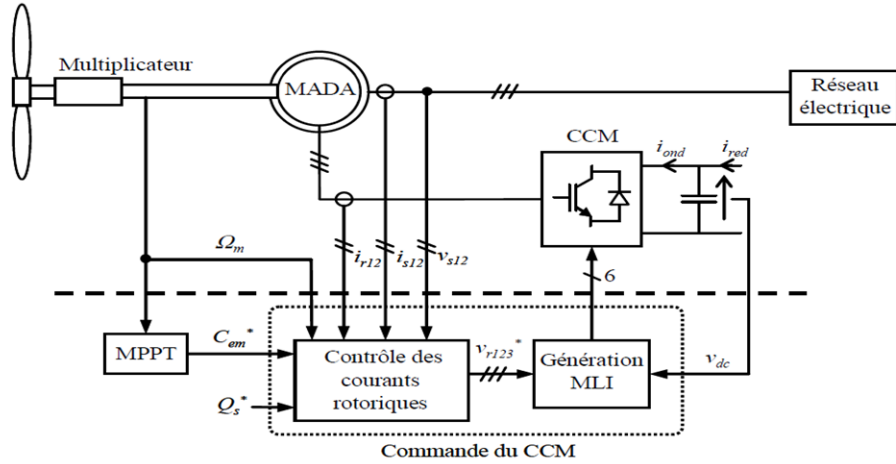


FIGURE III.27 – Principe de la commande du CCM.

III.2.3.1 Choix du référentiel pour le modèle de la MADA dans le repère dq

Le champ statorique tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique qui donne une idée visuelle de la phase et de l'amplitude du flux.

En choisissant le référentiel diphasé dq lié au champ tournant statorique [35] et en plaçant le vecteur flux statorique sur l'axe d , on peut écrire d'après la Figure III.28 :

$$\dot{\theta}_s = \omega_s; \dot{\theta}_r = \omega_r; \dot{\theta}_e = \omega_e = \omega_s - \omega_r = p\Omega_m \quad (\text{III.14})$$

Avec :

- ω_s : la pulsation statorique,
- ω_r : la pulsation rotorique,
- ω_e : la pulsation électrique entre les bobinages statorique et rotorique.

Et

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \varphi_{sq} = 0 \quad (\text{III.15})$$

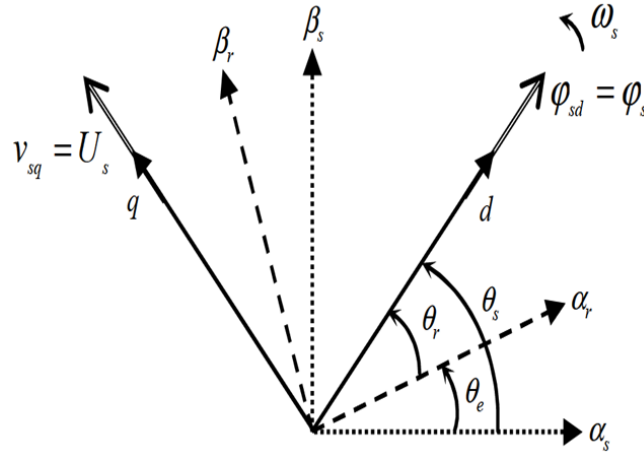


FIGURE III.28 – Référentiel diphasé dq lié au champ tournant statorique.

Dans le repère triphasé, la tension aux bornes d'une phase k du stator de la MADA s'exprime par ($k \in 1, 2, 3$) :

$$v_{sk} = R_s \cdot i_{sk} + \frac{d\varphi_{sk}}{dt} \quad (\text{III.16})$$

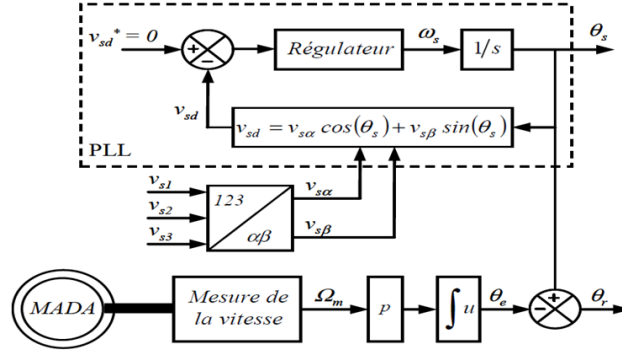
Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliens [28], l'équation précédente devient :

$$v_{sk} \approx \frac{d\varphi_{sk}}{dt} \quad (\text{III.17})$$

Cette équation démontre que la tension statorique et le flux statorique tournent tous les deux à la même vitesse. Cependant, la tension est en avance de $\pi/2$ radians sur le flux statorique. On peut donc écrire dans le repère dq lié au champ tournant statorique, en considérant le flux statorique constant, que :

$$v_{sd} = 0v_{sq} = V_s\sqrt{3} = U_s \quad (\text{III.18})$$

Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statoriques (θ_s) et pour les grandeurs rotoriques (θ_r), nous avons utilisé une boucle à verrouillage de phase appelée plus communément *PLL* (Phase Locked Loop), comme l'illustre la Figure III.29. Cette *PLL* permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau.


 FIGURE III.29 – Etablissement des angles de transformation à l'aide d'une *PLL*.

La phase rotorique forme un angle électrique e avec la phase statorique (Figure III.28). Ainsi, l'angle θ_r nécessaire aux transformations rotoriques est le résultat de la soustraction des angles θ_s et θ_e . Pour la méthode ici décrite, deux capteurs de tension et un capteur de vitesse sont donc nécessaires pour établir ces différents angles.

III.2.3.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

En considérant le choix du repère dq lié au champ tournant statorique et en négligeant la résistance des bobinages statoriques, une simplification des équations de la MADA dans le repère dq peut être obtenue à partir des équations (II.21 à II.24) :

$$v_{sd} = 0 \quad (\text{III.19})$$

$$v_{sq} = U_s = \omega_s \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{III.20})$$

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} \quad (\text{III.21})$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{rd} \quad (\text{III.22})$$

A partir des équations des flux statoriques et rotoriques (équations II.25 et II.26), on obtient les expressions des courants statoriques suivantes :

$$i_{sd} = \frac{\varphi_{sd} - m \cdot L_m \cdot i_{rd}}{L_s} \quad (\text{III.23})$$

$$i_{sq} = -\frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.24})$$

Ces expressions sont ensuite remplacées dans les équations des flux rotoriques (équations II.27 et II.28) qui deviennent alors :

$$\varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{(m \cdot L_m)^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + \frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot \varphi_{sd} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} + \frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{III.25})$$

$$\varphi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} - \frac{(m \cdot L_m)^2}{L_s} \cdot i_{rq} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{rq} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

- σ : le coefficient de dispersion de la MADA.

En remplaçant les expressions des composantes directe et en quadrature des flux rotoriques (équations III.25 et III.26) dans les équations (III.21) et (III.22), nous obtenons :

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \sigma \cdot L_r \frac{di_{rd}}{dt} + e_{rd} \quad (\text{III.27})$$

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rq} + \sigma \cdot L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_{rq} + e_\phi \quad (\text{III.28})$$

Où :

$$e_{rd} = -\sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rq} \quad (\text{III.29})$$

$$e_{rq} = \sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.30})$$

$$e_\phi = \omega_r \cdot \frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{III.31})$$

Pour le couple électromagnétique, l'équation (II.37) devient :

$$C_{em} = -p \frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.32})$$

Les puissances active et réactive statoriques s'expriment alors par :

$$P_s = -v_{sq} \frac{m \cdot L_m}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.33})$$

$$Q_s = \frac{v_{sq} \cdot \varphi_{sd}}{L_s} - \frac{v_{sq} \cdot m \cdot L_m}{L_s} \cdot i_{rd} \quad (\text{III.34})$$

Ces dernières expressions montrent que dans l'hypothèse où le flux sd est maintenu constant (cette condition est assurée dans le cas d'un réseau stable connecté au stator de la MADA), le choix du repère dq rend le couple électromagnétique produit par la MADA, et par conséquent la puissance statorique, proportionnelle au courant rotorique d'axe q . La puissance réactive statorique, quant à elle, n'est pas proportionnelle au courant rotorique d'axe d due à une constante imposée par le réseau. Ainsi, ces puissances statoriques peuvent être contrôlées indépendamment l'une de l'autre.

Le modèle de la MADA dans le repère dq lié au champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants rotoriques étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque courant peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs

seront le courant rotorique d'axe q et le courant rotorique d'axe d .

Afin d'établir les boucles de régulation des courants rotoriques, nous supposons que le CCM est idéal (ce qui correspond à négliger les temps morts imposés par les drivers des interrupteurs de puissance du CCM) et modélisé au sens des valeurs moyennes. Ainsi, le CCM peut être représenté par un gain G_c dont l'expression est :

$$G_c = \frac{v_{dc}}{2 \cdot V_p} \quad (\text{III.35})$$

Avec :

- V_p : l'amplitude de la porteuse triangulaire servant à la génération de la *MLI*.

De plus, nous supposons que les tensions rotoriques v_{rk} sont égales à leurs références v_{rk}^* ($k \in 1, 2, 3$), ce qui implique que l'amplitude de la porteuse V_p doit être fixée à $v_{dc}/2$, correspondant ainsi à un gain G_c égal à 1.

Le schéma bloc des boucles de régulation des courants rotoriques d'axes dq est présenté à la Figure III.30. Les régulateurs utilisés sont des correcteurs de type *PI*.

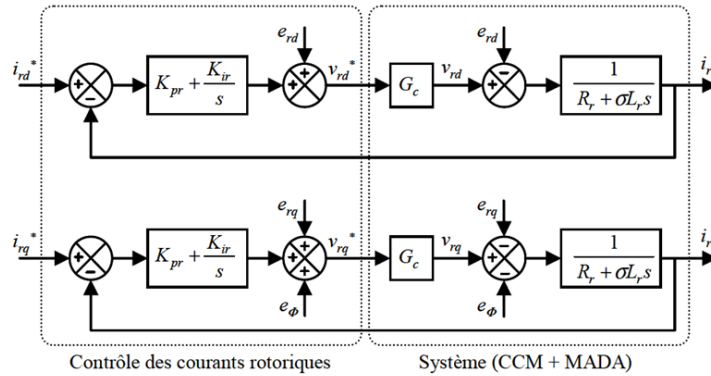


FIGURE III.30 – Principe du contrôle des courants rotoriques de la MADA.

Le courant rotorique de référence d'axe q est issu du contrôle MPPT via le couple électromagnétique de référence (Figure III.26). Le courant rotorique de référence d'axe d est, quant à lui, issu du contrôle de la puissance réactive statorique.

La Figure III.31 représente le schéma bloc de la commande du CCM. Cette commande permet de contrôler indépendamment les courants rotoriques d'axes dq et donc les puissances active et réactive statoriques de la MADA.

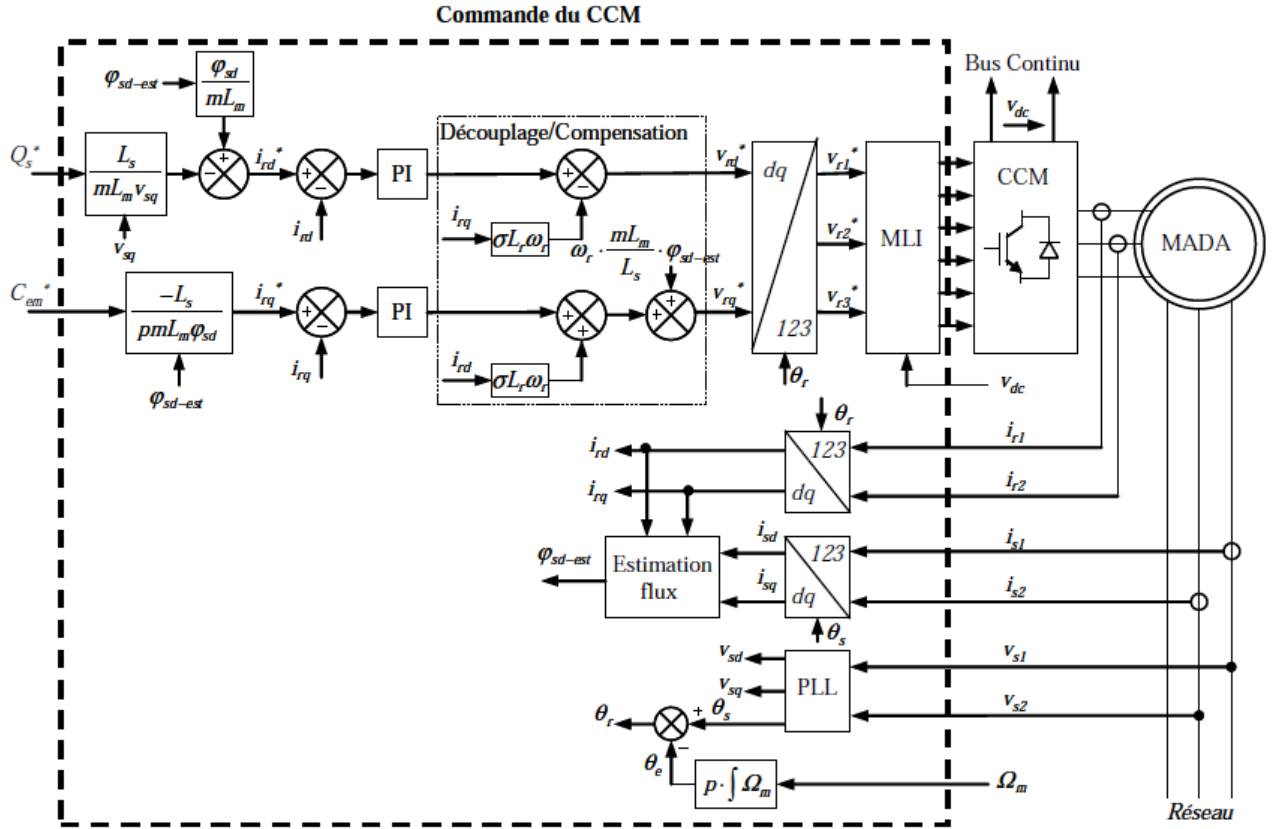


FIGURE III.31 – Commande du CCM.

III.2.3.3 Génération des courants rotoriques de référence

La connaissance du flux statorique est nécessaire à la génération des courants rotoriques de référence d'axes dq (voir Figure III.31). Dans notre étude, le réseau électrique est supposé être stable et le repère dq choisi est lié au champ tournant statorique : ainsi, le flux statorique d'axe d peut être estimé en boucle ouverte à partir des mesures des courants statorique et rotorique d'axe d :

$$\varphi_{sd-est} = L_s \cdot i_{sd} + m \cdot L_m i_{rd} \quad (\text{III.36})$$

Une fois le flux statorique estimé, il faut générer les courants rotoriques de référence d'axes dq. Le couple électromagnétique étant proportionnel au courant rotorique d'axe q (d'après l'équation III.32), nous pouvons donc établir une relation entre le courant i_{rq}^* et le couple électromagnétique C_{em}^* , issu du bloc de contrôle MPPT, par :

$$i_{rq}^* = -\frac{L_s}{p \cdot m \cdot L_m \cdot \varphi_{sd-est}} \cdot C_{em}^* \quad (\text{III.37})$$

Concernant le courant rotorique de référence d'axe d, deux méthodes sont développées dans la littérature :

- soit on établit le courant i_{rd}^* afin de contrôler la puissance réactive statorique,
- soit on établit le courant i_{rd}^* de façon à minimiser les pertes Joule statorique et rotorique [Tang, 1995].

Dans le cadre de cette thèse, nous retiendrons la première solution car nous avons choisi de contrôler la valeur de la puissance réactive statorique.

L'expression du courant i_{rd}^* en fonction de la puissance réactive Q_s^* est établie, à partir de l'équation (III.34), par :

$$i_{rd}^* = \frac{\varphi_{sd-est}}{m \cdot L_m} - \frac{L_s}{m \cdot L_m \cdot v_{sq}} \cdot Q_s^* \quad (\text{III.38})$$

III.3 Commande du convertisseur côté réseau

Le CCR est connecté entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre RL. Ce convertisseur a deux rôles : maintenir la tension du bus continu constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique. La Figure III.32 décrit la commande du CCR. Cette commande réalise donc les deux fonctions suivantes :

- le contrôle des courants circulant dans le filtre RL,
- le contrôle de la tension du bus continu.

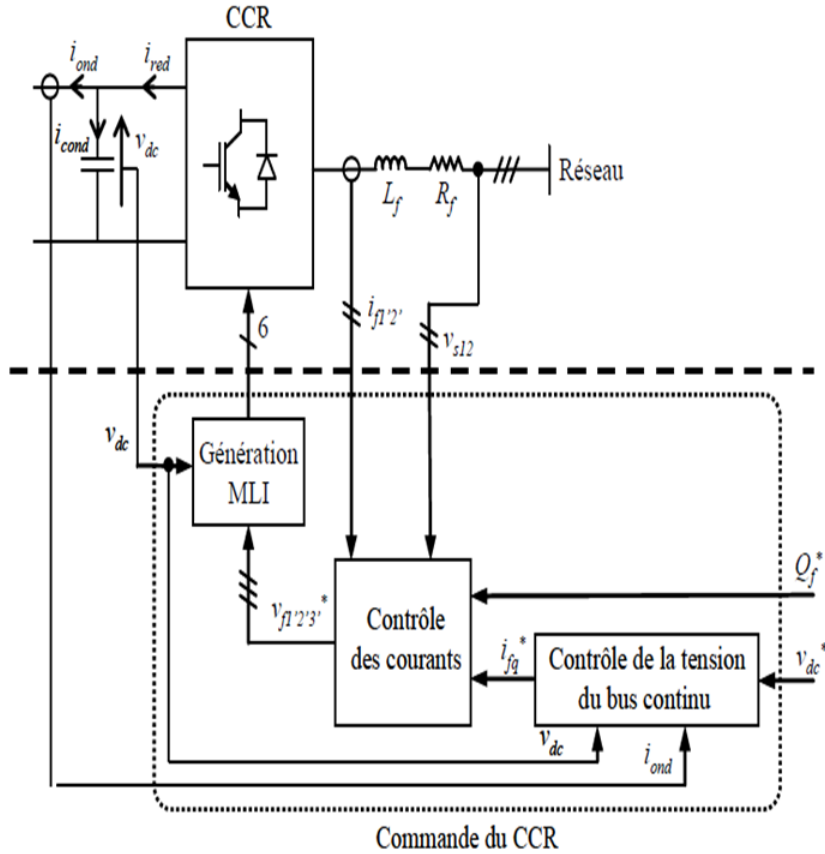


FIGURE III.32 – Principe de la commande du CCR.

III.3.1 Contrôle des courants transitoire dans le filtre RL

Dans le repère dq lié au champ tournant statorique, les équations (?? et ??) deviennent :

$$v_{fd} = -R_f \cdot i_{fd} - L_f \frac{di_{fd}}{dt} + e_{fd} \quad (\text{III.39})$$

$$v_{fq} = -R_f \cdot i_{fq} - L_f \frac{di_{fq}}{dt} + e_{fq} \quad (\text{III.40})$$

Où :

$$e_{fd} = \omega_s \cdot L_f \cdot i_{fq} \quad (\text{III.41})$$

$$e_{fq} = -\omega_s \cdot L_f \cdot i_{fd} + v_{sq} \quad (\text{III.42})$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère dq suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe

peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes dq.

Comme pour la régulation des courants rotoriques, nous modélisons le convertisseur par un gain G_c (voir équation III.35), avec ici G_c égal à 1. Le schéma bloc des boucles de régulation des courants d'axes dq est décrit à la Figure III.33. Les correcteurs utilisés sont de type PI. Dans ces schémas blocs de régulation apparaissent les termes de compensation et de découplage des axes dq ainsi que les modèles du CCR et de la liaison de celui-ci au réseau via le filtre RL suivant le repère dq.

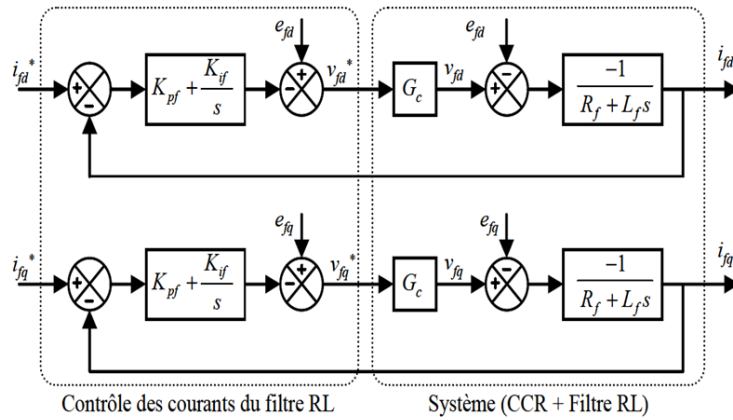


FIGURE III.33 – Contrôle des courants circulant dans le filtre RL.

Les courants de référence i_{fq}^* et i_{fd}^* sont respectivement issus du bloc de contrôle de la tension du bus continu et du contrôle de la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique (Figure III.32).

En négligeant les pertes dans la résistance R_f du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère dq lié au champ tournant statorique ($v_{sd} = 0$), les équations ?? et III.4 deviennent :

$$P_f = v_{sq} \cdot i_{fq} \quad (\text{III.43})$$

$$Q_f = v_{sq} \cdot i_{fd} \quad (\text{III.44})$$

A partir de ces relations, il est alors possible d'imposer les puissances active et réactive de référence, notées ici P_f^* et Q_f^* , en imposant les courants de référence suivants :

$$i_{fd}^* = \frac{Q_f^*}{v_{sq}} \quad (\text{III.45})$$

$$i_{fq}^* = \frac{P_f^*}{v_{sq}} \quad (\text{III.46})$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle, est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée ($Q_f^* = 0 \text{ VAR}$).

III.3.2 Contrôle de la tension du bus continu

A partir de l'équation II.40, nous pouvons exprimer les puissances mises en jeu sur le bus continu :

$$P_{red} = v_{dc} \cdot i_{red} P_c = v_{dc} \cdot i_{cond} P_{ond} = v_{dc} \cdot i_{ond} \quad (\text{III.47})$$

Ces puissances sont liées par la relation :

$$P_{red} = P_c + P_{ond} \quad (\text{III.48})$$

Si l'on néglige l'ensemble des pertes Joule devant la puissance échangée entre le rotor de la MADA et le réseau électrique (pertes dans le condensateur, le convertisseur et le filtre RL), on peut alors écrire :

$$P_f = P_{red} = P_c + P_{ond} \quad (\text{III.49})$$

En réglant la puissance P_f , il est alors possible de contrôler la puissance P_c dans le condensateur et donc de réguler la tension du bus continu. Pour ce faire, les puissances P_{ond} et P_c doivent être connues afin de déterminer P_f^* .

La référence de puissance pour le condensateur est liée au courant de référence circulant dans le condensateur :

$$P_c^* = v_{dc} \cdot i_{cond}^* \quad (\text{III.50})$$

La régulation de la tension du bus continu s'effectue alors par une boucle externe (par rapport à la boucle interne de régulation des courants), permettant de maintenir une tension constante sur le bus continu, avec un correcteur PI générant le courant de référence i_{cond}^* dans le condensateur.

La Figure III.34 présente le schéma bloc du contrôle de la tension du bus continu. On considère, pour simplifier la chaîne de régulation, que le courant de référence i_{fq}^* est toujours égal au courant i_{fq} car le temps de réponse de la boucle interne est plus faible que celui de la boucle externe.

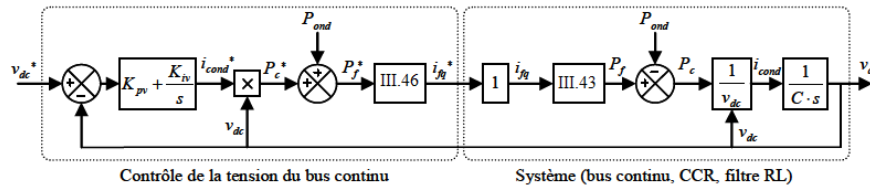


FIGURE III.34 – Boucle de régulation de la tension du bus continu.

A la Figure III.34 apparaît la puissance disponible Pond correspondant à la puissance rotorique : c'est une perturbation vu de la régulation et elle sera compensée dans la chaîne de régulation. La Figure III.35 représente le schéma bloc de la commande du CCR. Ce schéma bloc inclut les termes de découplage et de compensation afin de pouvoir contrôler indépendamment les courants d'axes dq circulant dans le filtre RL et les puissances active et réactive échangées entre le CCR et le réseau.

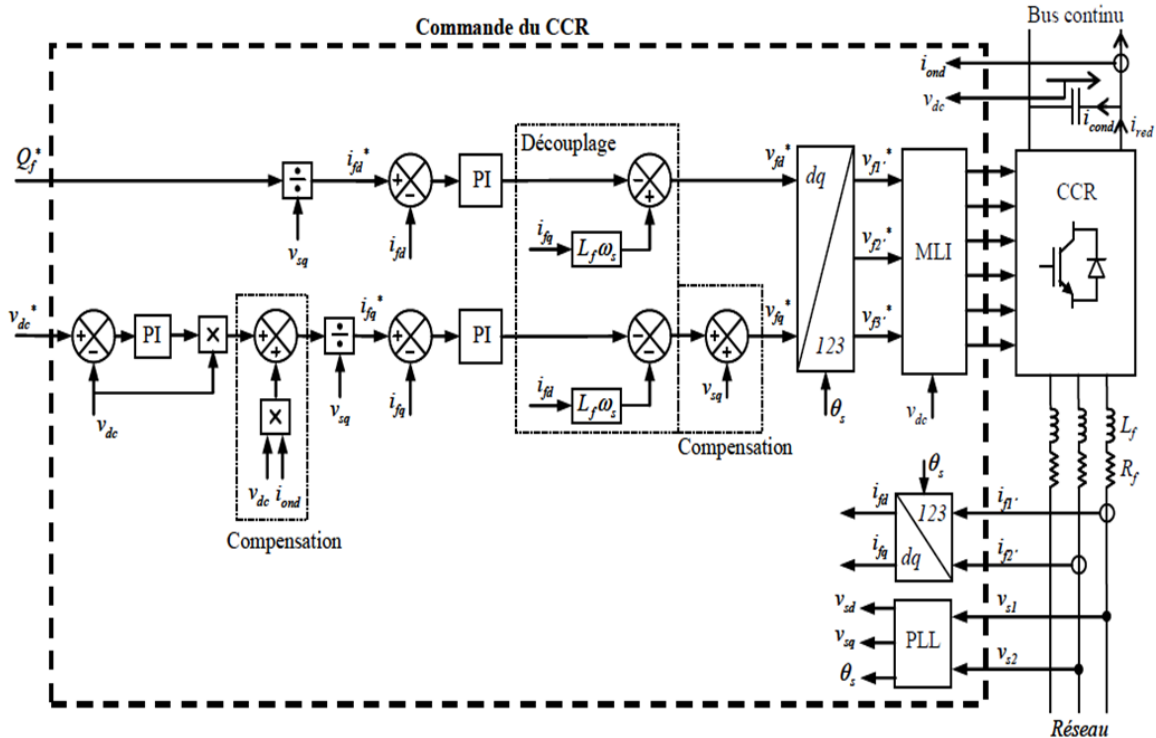


FIGURE III.35 – Commande du CCR.

III.4 Résultats de simulation

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab de la société MathWorks ainsi qu'avec les bibliothèques associées à Matlab : SimPowerSystems et Simulink.

III.4.1 Simulations de la chaîne photovoltaïque

Après avoir conçu un système quelconque, il est primordial de s'assurer du comportement de ce dernier face à plusieurs cas de figure envisageables dans la pratique, et ce pour être sur que notre produit remplisse bien les exigences du cahier de charges.

Nous présenterons dans ce qui suit l'ensemble des résultats de simulation concernant la commande MPPT appliquée au système photovoltaïque

III.4.1.1 Fonctionnement du système photovoltaïque sous des conditions nominales

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On se met dans le cas des conditions standards : la température est égale à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement à $1000\text{ W}/\text{m}^2$

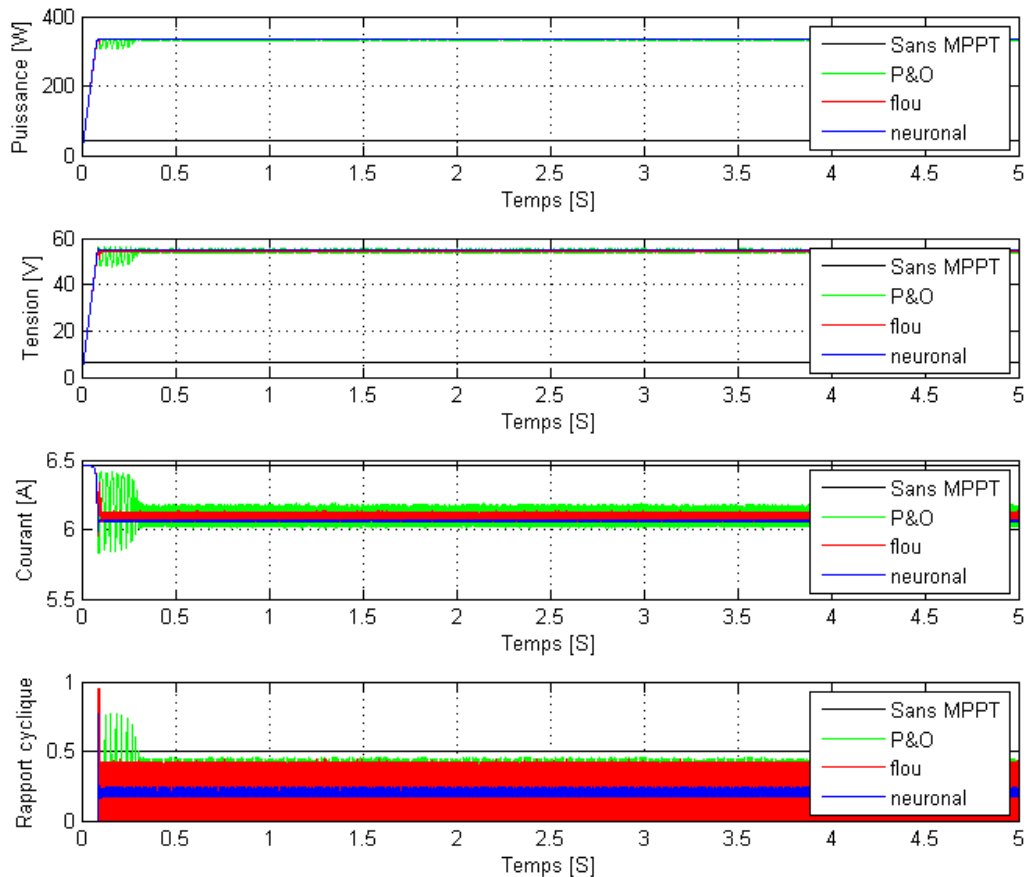


FIGURE III.36 – Réponse du système photovoltaïque à une température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un ensoleillement de $1000\text{ W}/\text{m}^2$

Le résultat de simulation obtenu sur la figure III.36 montre que la puissance délivrée par le générateur est maximale pour les trois types de MPPT alors qu'en l'absence de ce dernier on constate que le point de fonctionnement est loin du MPP et donc l'énergie extraite n'est pas maximale d'où la nécessité de la MPPT.

On remarque que les trois commandes MPPT appliquées aux système photovoltaïque

permettent de suivre le point de puissance maximale. Cependant avec des performances très différentes. En effet, en appliquant l'algorithme P&O on observe plusieurs oscillations de la puissance extraite avant qu'elle ne se stabilise avec de petites oscillations due à la perturbation continue de la tension. Alors qu'avec le contrôleur flou le changement de la tension de référence se fait de manière plus précise dès que l'on se rapproche du point de puissance maximale d'où des oscillations beaucoup moins importantes. Les oscillations sont encore plus atténuées à l'aide du contrôleur neuronal comme le montre clairement la figure III.37.

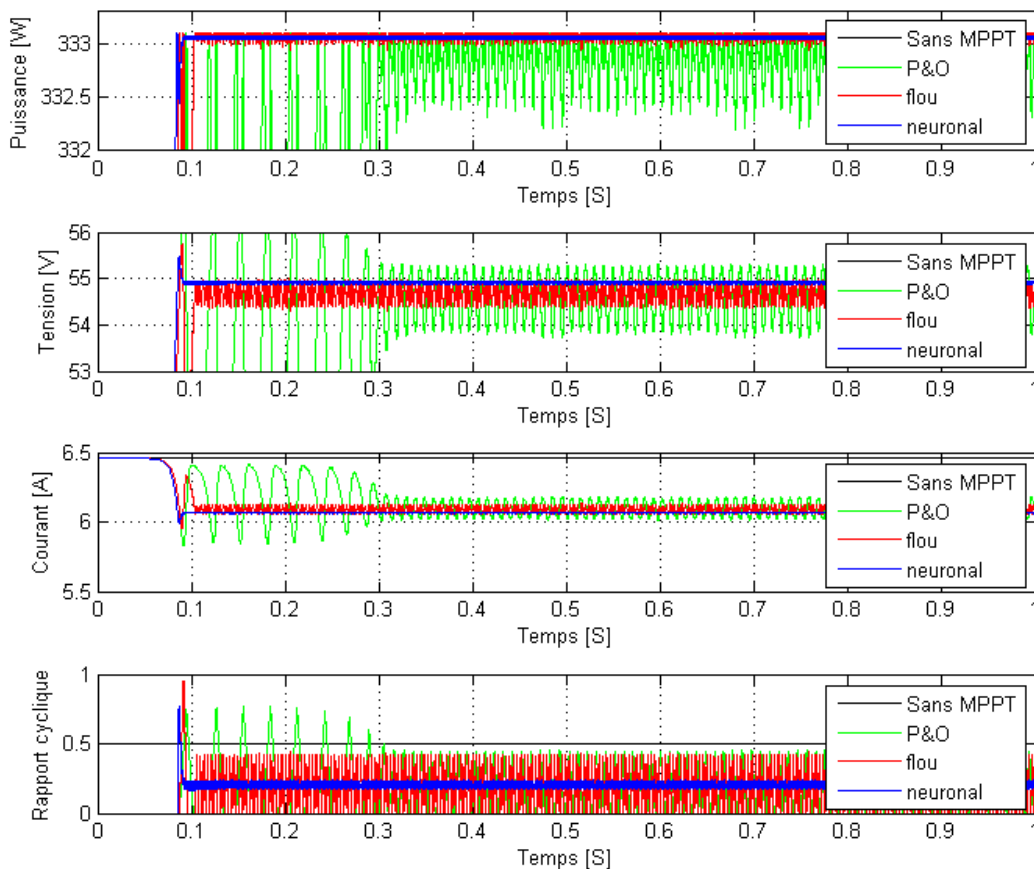


FIGURE III.37 – Réponse du système photovoltaïque en régime permanent

De ce point de vue la différence de performances entre les commandes MPPT en régime permanent n'est pas très visible mais appliquées à des générateurs photovoltaïques de l'ordre du kilowatt la différence de performances des différents contrôleurs est grande.

III.4.1.2 Comportement du système face à un changement de l'éclairement

L'éclairement correspond à l'un des facteurs principaux influent sur le comportement du panneau photovoltaïque. Afin d'évaluer des commandes de poursuite du point de puissance maximale, le système photovoltaïque est soumis à des variations des conditions d'ensoleillement. Par ailleurs, Les générateurs PV seront soumis à des changements brusques de l'éclairement dûs principalement aux ombres des structures, de la végétation et des nuages.

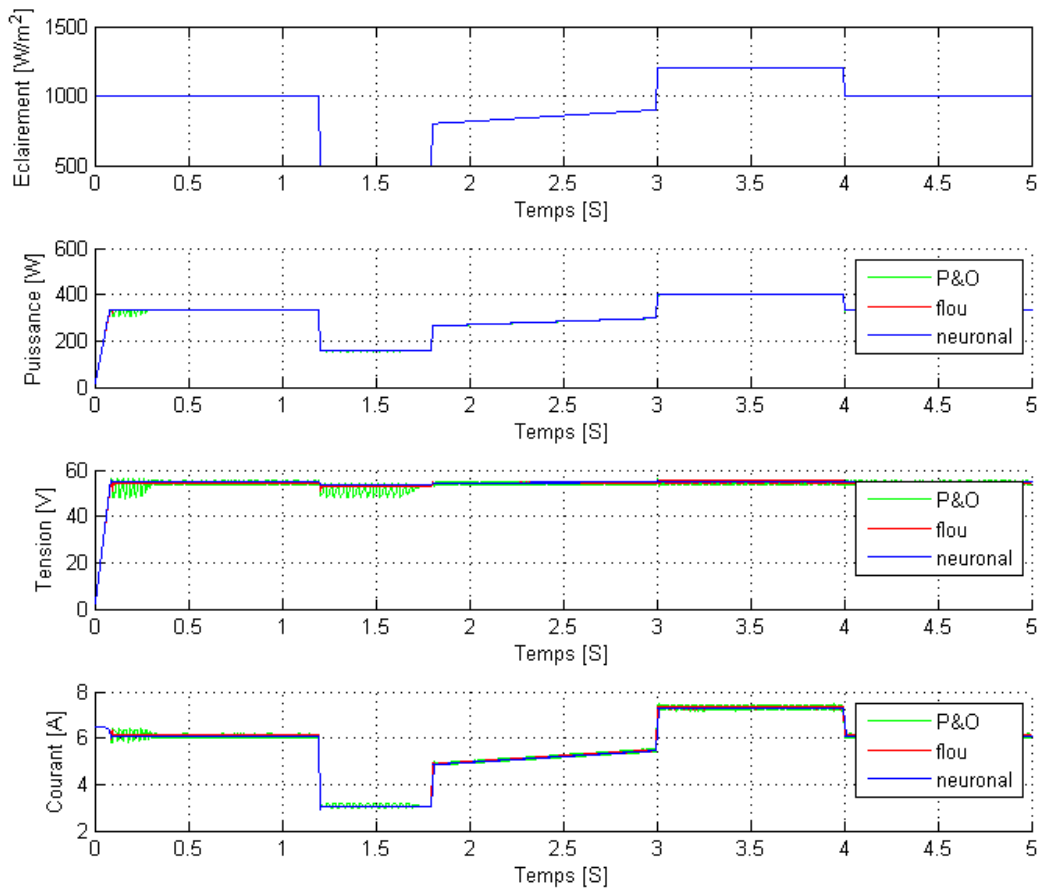


FIGURE III.38 – Réponse du système photovoltaïque à des variations de l'ensoleillement à une température constante de 25°C

III.4.1.3 Comportement du système face à un changement de température

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

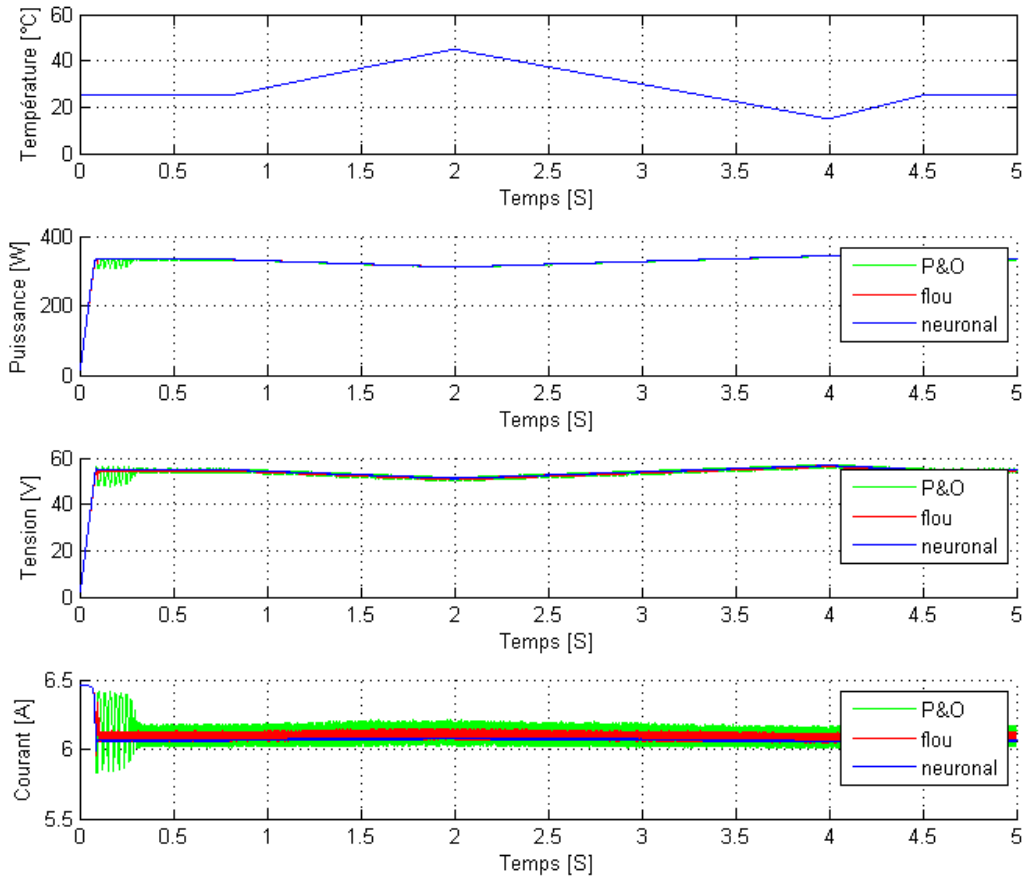


FIGURE III.39 – Réponse du système photovoltaïque à des variations de la température à éclaircement constant de 1000 W/m^2

III.4.2 Simulation de la chaîne éolienne

Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre, nous présentons dans cette section : le mode de fonctionnement hyposynchrone.

Pour ces simulations, nous considérons que le système éolien est en régime permanent et qu'il fonctionne dans la zone de fonctionnement optimal (Zone 2), c'est-à-dire qu'il produit le maximum de puissance en fonction de la vitesse du vent.

Pour ce mode de fonctionnement, un vent d'une vitesse moyenne à 7 m/s est appliqué sur les pales de l'éolienne, ce qui correspond à une vitesse de la MADA en contrôle MPPT d'environ 1050 tr/min, soit un glissement de 30% en mode hyposynchrone.

Les figures présentent l'évolution temporelle des différentes valeurs électriques du système éolien.

A partir de l'instant $t = 20$ s et jusqu'à l'instant $t = 40$ s, nous avons fixé la puissance réactive statorique de référence à -1 MVar (Figure III.43), ce qui correspond aux changements de références sur les courants rotoriques i_{rd} (Figure ref5m), sur les tensions rotoriques (Figure ref6) et également sur la puissance réactive rotorique Q_r . Nous remarquons que le temps de réponse en courant du système est bien égal à 50 ms comme nous l'avions imposé pour la synthèse des correcteurs.

A partir de l'instant $t = 40$ s et jusqu'à l'instant $t = 60$ s, nous avons changé la puissance réactive statorique de référence (Figure ref4m). Là encore, les différentes puissances réactives sont correctement régulées avec le temps de réponse égal à celui fixé précédemment.

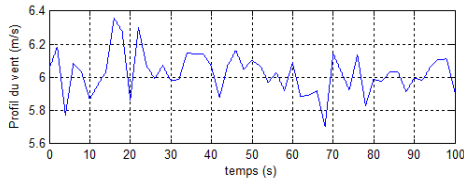


FIGURE III.40 – Profil du vent

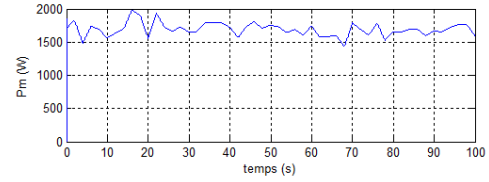


FIGURE III.41 – Puissance mécanique

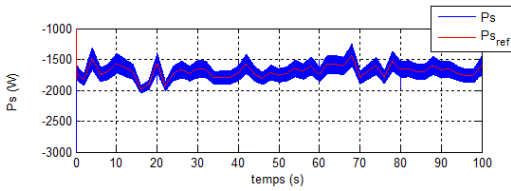


FIGURE III.42 – Puissance statoriques active

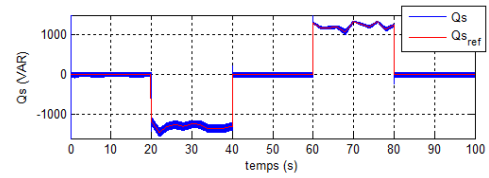


FIGURE III.43 – Puissance statoriques réactive

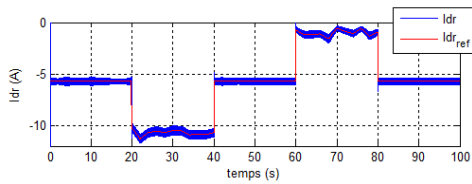


FIGURE III.44 – Les courants rotoriques dans le plan (d,q)

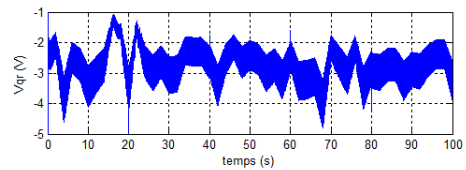
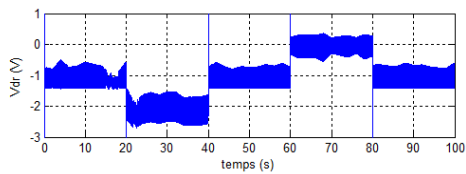
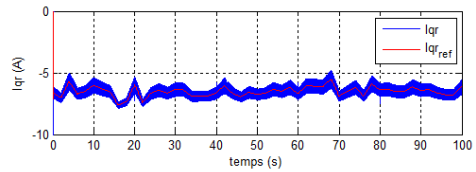


FIGURE III.45 – Les tensions rotoriques dans le plan (d,q)

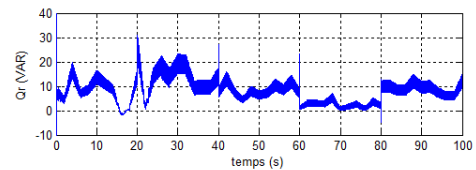
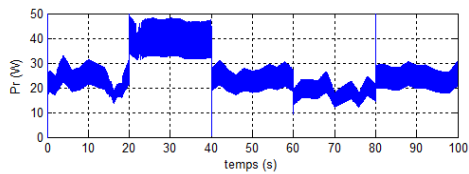


FIGURE III.46 – Les puissances rotoriques active et réactive

III.4.3 Simulation de la connexion au réseau

Dans cette partie nous présentons les résultats de simulation de la connexion au réseau.

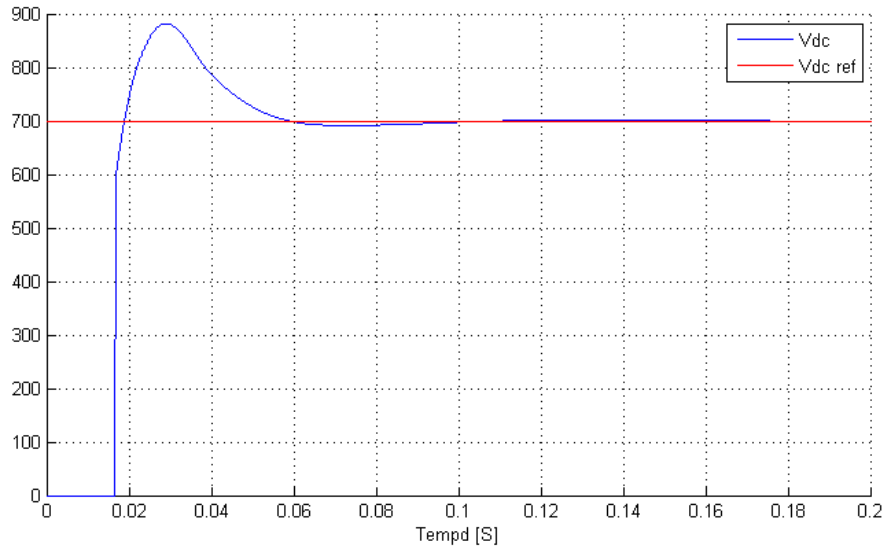


FIGURE III.47 – Regulation du bus continu

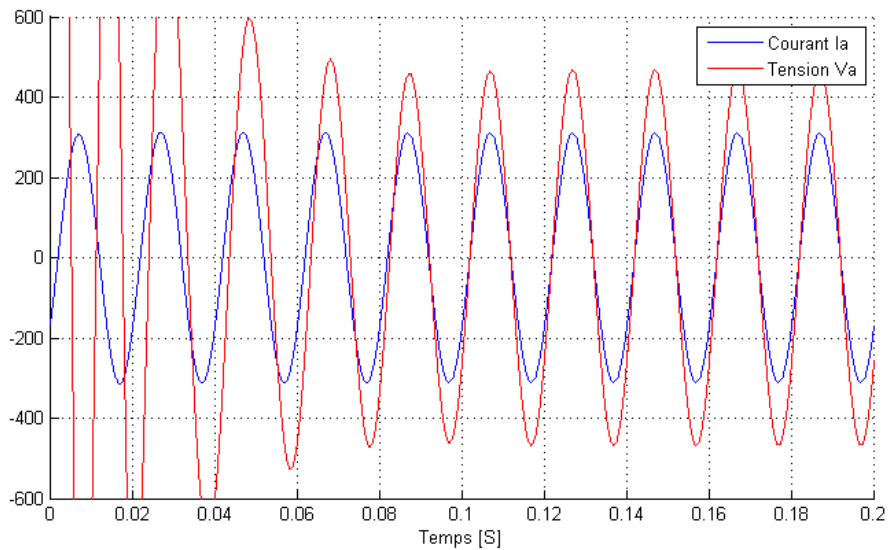


FIGURE III.48 – Tension et courant de sortie

On remarque bien que la tension du bus continu suis la tension de référence de 700 volts comme le montre la figure III.47.

Aussi le courant et la tension de phase sont bien en phase, ce qui assure un facteur de puissance unitaire et une puissance réactive nulle.

Chapitre IV

Application

IV.1 Introduction

Afin de prédire le comportement énergétique du bâtiment, et ce dans le but de dimensionner les générateurs d'énergie renouvelables une modélisation du bâtiment doit être faite. Nous utiliserons dans ce chapitre le logiciel Pleiades + Comfie.

IV.2 modélisation du bâtiment

IV.2.1 présentation de l'outil de simulation "COMFIE"

COMFIE est un outil logiciel de simulation thermique multizone du bâtiment qui a été développé au sein du Centre Énergétique et Procédés de l'École des Mines de Paris [36]. Il peut être utilisé dès la phase d'avant-projet pour optimiser la conception des bâtiments bioclimatiques. Ce logiciel calcule la température horaire dans chaque zone thermique, les besoins de chaleur et de rafraîchissement et la consommation électrique du bâtiment. Le modèle de bâtiment de COMFIE est adapté à la conception bioclimatique : il intègre notamment les apports solaires, les apports internes, les échanges thermiques conductifs, convectif, radiatifs et par renouvellement d'air, et il tient compte de l'inertie thermique dans chaque zone. Les calculs s'appuient sur un modèle numérique aux différences finies résolu après simplification par analyse modale [3]. La simulation du bâtiment a été complétée par des modules de calcul concernant l'intégration des énergies renouvelables [42].

L'utilisation de COMFIE est facilitée par un chaînage en amont avec le logiciel ALCYONE qui permet la saisie rapide des caractéristiques géométriques du bâtiment et par l'interface graphique PLÉIADES qui permet la saisie des caractéristiques des parois, matériaux, ouvertures, masques etc., de ses équipements et des scénarios de fonctionnement (occupation, ventilation, consignes de température) et l'affichage des résultats de simulation sous forme graphique [38].

La Figure IV.1 représente schématiquement la structure interne de COMFIE. Le logiciel est composé d'un coeur de calcul et d'un ou plusieurs modules additionnels associés selon une structure étoilée. Coeur de calculs et modules s'appuient sur une programmation orientée objet permettant de structurer les données par analogie avec les objets représentés. La communication entre COMFIE et son interface est assurée via des fichiers de texte contenant les paramètres d'entrée ou les résultats de simulation.

Le coeur de calcul assure la gestion de l'ensemble de la simulation. Il lit les paramètres d'entrée à partir des fichiers textes correspondants et réalise l'ensemble des initialisations nécessaires. Ensuite, il calcule les apports solaires à partir des données météorologiques, réalise le maillage du bâtiment, puis l'analyse modale du système d'équations pour le

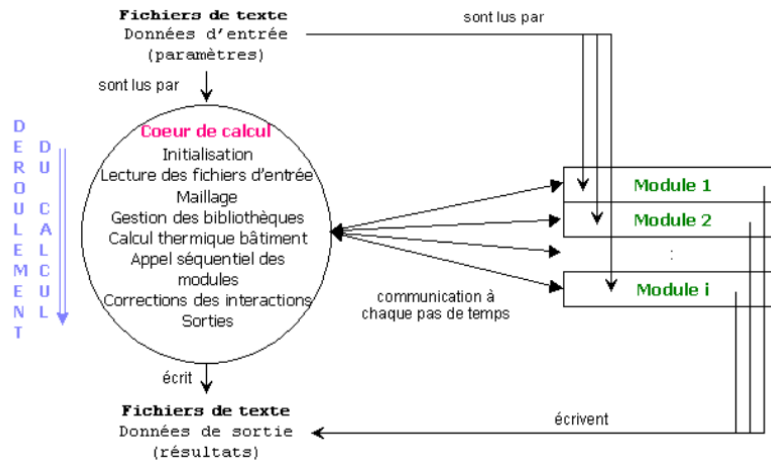


FIGURE IV.1 – Structure des échanges d’information au sein de COMFIE

modèle de bâtiment. Dès que la simulation démarre, le coeur de calcul, à chaque pas de temps t_n et pour chaque zone du bâtiment, calcule la température de zone au temps t_{n+1} à partir de la température au temps t_n . Il active pour cela, séquentiellement, chacun des modules additionnels qui transmettent leur contribution sous la forme d’une puissance fournie à chaque zone thermique du bâtiment. L’interaction entre modules et coeur de calcul est gérée par diverses procédures, qui peuvent être itératives dans le cas d’un échange d’air (structure algorithmique de type « oignon » [13]). Le processus est répété à chaque pas de temps. Finalement, le coeur de calcul et chaque module écrivent les résultats horaires sous la forme de fichiers de texte. L’intérêt des modules de COMFIE réside dans leur couplage au modèle de bâtiment. Plusieurs modules sont disponibles (systèmes photovoltaïques, éclairage, chauffe-eau solaire) et d’autres sont en développement (bilan d’humidité, pompes à chaleur, mouvement d’air, éclairage détaillé, solaire thermique).

IV.2.2 Modélisation du bâtiment

La modélisation intègre trois aspects : le site, le bâti (architecture, structure, enveloppe, matériaux, etc.) et l’utilisation du bâtiment (équipements actifs, occupation, ventilation, protections solaires, etc.).

Le site est représenté par des données climatiques horaires (température de l’air extérieur, rayonnement solaire global horizontal, rayonnements solaires diffus horizontal et direct normal) sur une année typique. En pratique, ces données sont issues de la station météorologique la plus proche du site. Les masques éventuels et la hauteur de l’horizon sont pris en compte.

IV.2.2.1 Le bâti

Géométrie et enveloppe du bâtiment La géométrie du bâtiment a été décrite via le logiciel ALCYONE. Toutes les parois principales et les ouvertures intérieures (portes) et extérieures (portes, portes-fenêtres et fenêtres) saisies respectent les dimensions, positions et orientations fournies par le plan du bâtiment pour chacun des deux niveaux. Le rez-de-chaussée, outre les garages, regroupe l'ensemble des pièces à vivre : séjour, cuisine, entrée, bureau, réserve (IV.2), tandis que l'étage regroupe les pièces de repos : chambres, salle de bain, salon IV.3.

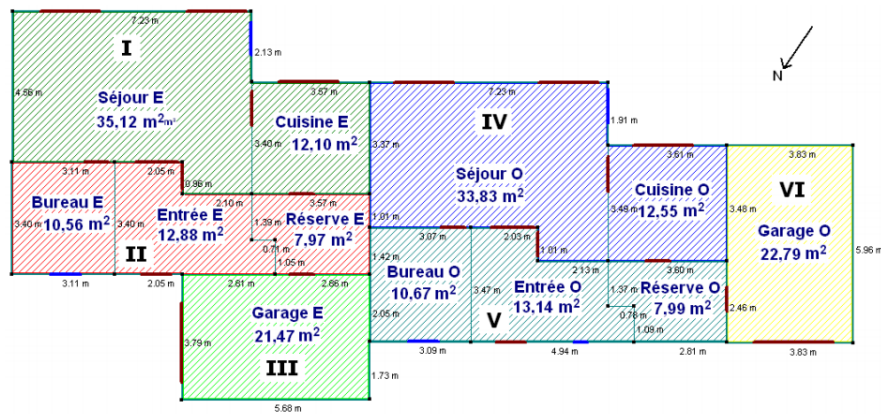


FIGURE IV.2 – Plan du rez-de-chaussée modélisé

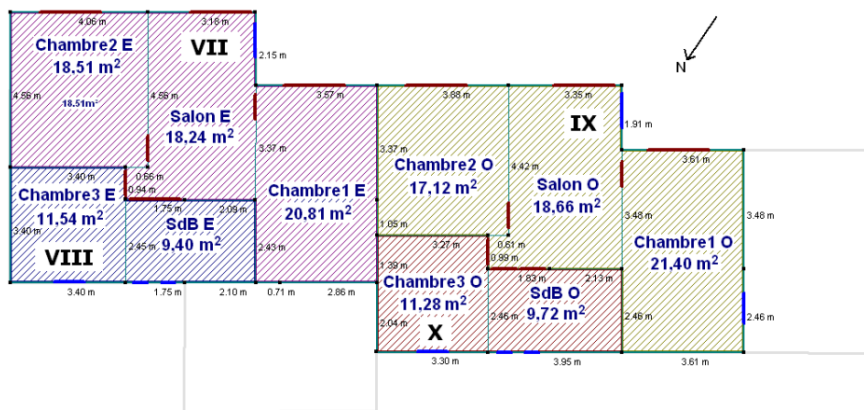


FIGURE IV.3 – Plan du premier étage modélisé

Pour simplifier le modèle, les pièces ont été regroupées en zones thermiques, considérées à température homogène tout au long de la simulation. Ces zones se distinguent par leur

orientation (nord, sud) et par leur occupation spécifique (jour, nuit, etc.). Cinq zones thermiques ont été définies pour chaque logement, soit dix zones au total IV.4 :

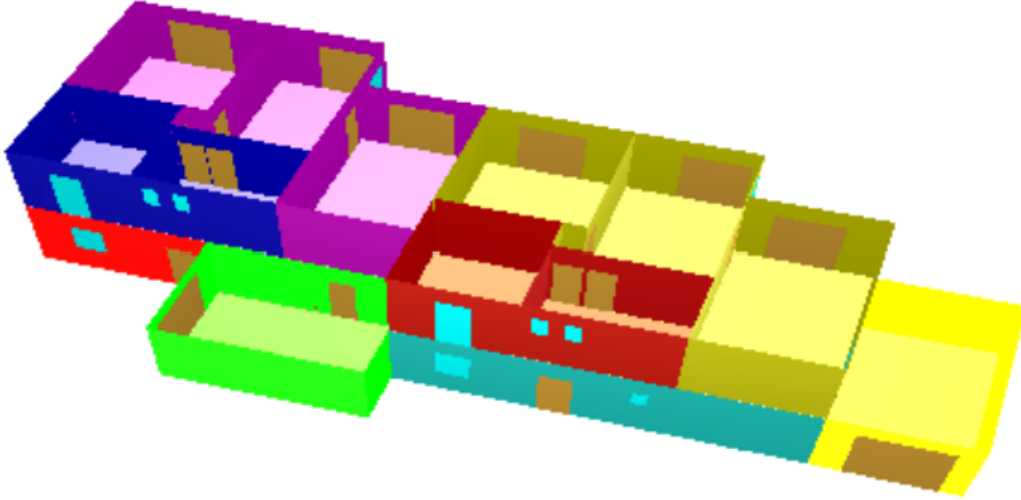


FIGURE IV.4 – Représentation en 3 dimensions du bâtiment modélisé

Le comble, situé au-dessus de l'isolant, est considéré à température extérieure ; cet espace n'est donc pas modélisé comme une zone. La dalle est construite sur terre-plein. La surface habitable de chaque logement représente $132m^2$ (surface de référence).

Composition des parois Le Tableau (annexe) récapitule la composition et les propriétés des neuf types de parois qui ont été considérés pour le bâtiment.

Composition des ouvertures Le Tableau (annexe) ci-après récapitule la composition et les propriétés des quatre types d'ouvertures qui ont été considérés pour le bâtiment.

Le facteur solaire global des vitrages est modulé selon la saison par des scénarios d'occultation.

Autres éléments Des masques ont été spécifiés sur les vitrages des façades sud-est et nord-est afin de tenir compte de la présence de la grange voisine, d'une part, et de la géométrie particulière de la façade sud-est (présence de balcons, retraits), d'autre part.

Des ponts thermiques ont été considérés sur l'ensemble des façades au niveau des fondations et du plafond mais pas entre les logements et les garages. En l'absence de mesures et de connaissance de la qualité des finitions, les coefficients de transmission thermique linéiques sont difficiles à évaluer. Ils ont donc tous été fixés forfaitairement à $0,1W.K^{-1}.m^{-1}$ (soit au total $13,6W.K^{-1}$), ce qui correspond à des ponts thermiques faibles (voir par exemple [21]).

IV.2.2.2 Les scénarios d'utilisation du bâtiment

Ces scénarios décrivent l'utilisation du bâtiment. Sauf mention contraire, ils s'appliquent tous les jours de l'année; aucune distinction n'a été réalisée pour les weekends et périodes de vacances.

Scénarios d'occupation Chaque occupant représente une source de chaleur, d'une puissance moyenne supposée de 80 W. Quelle que soit la période considérée, les scénarios d'occupation ont été définis par rapport à une référence de quatre occupants par logement. Trois scénarios d'occupation distincts ont été considérés :

Scénarios de puissance dissipée Des scénarios de puissance dissipée ont été considérés en supposant que l'énergie dissipée par l'ensemble des systèmes consommateurs d'énergie intérieurs (éclairage, électroménager) s'élève à environ 1 500 kWh par an et par logement, dont environ 350 kWh pour la cuisson, supposée entièrement électrique. Cette hypothèse correspond à un logement économe [39]. Elle pourrait doubler si les habitants utilisaient des luminaires et des appareils électroménagers fortement consommateurs en énergie. La majorité de cette énergie est dissipée dans les séjours et les cuisines.

Les équipements considérés sont généralement consommateurs d'électricité. La consommation d'électricité est néanmoins supérieure à la puissance dissipée car il est possible que la chaleur consécutive à une consommation d'électricité ne soit pas dissipée dans le bâtiment. C'est le cas, par exemple, de l'eau chauffée dans un lave-linge qui est directement évacuée après usage, sans céder sa chaleur au bâtiment. Ici la consommation des appareils chauffant de l'eau avant de l'évacuer et la surconsommation électrique induite par le système de ventilation ont été intégrés au bilan électrique.

Scénarios d'occultation La gestion des apports solaires passifs passe par celle des protections solaires. Deux cas sont considérés selon l'usage de la zone :

Scénarios saisonniers Deux types de scénarios ont été distingués, selon la période de l'année.

- Période de chauffage (HIVER) En période de chauffage, la consigne de température est fixée à 19C, 24h/24h et dans toutes les pièces du logement (hors garage non-chauffé). Il s'agit d'une hypothèse : l'utilisation d'une programmation ou d'une régulation par zone permettrait de moduler plus finement cette température.

En ce qui concerne le renouvellement d'air, le débit hygiénique ($0,5\text{vol.h}^{-1}$) correspond à $135\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ pour la cuisine, $30\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ pour la salle de bains de l'étage, $30\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ pour le WC et $15\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ pour la petite salle d'eau du rez-de-chaussée, soit un total de $210\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. La ventilation de toutes les pièces depuis l'extérieur est fixée à ce débit hygiénique, mais un débit de $0,03\text{vol.h}^{-1}$ a été ajouté pour représenter les infiltrations.

Cette valeur a été calculée par la méthode de l'AIVC à partir du renouvellement à n50 [31]. Le récupérateur sur air vicié (efficacité moyenne de 80 %) est actif et couplé à l'échangeur air-sol.

Les données météorologiques employées sont celles retenues par la réglementation thermique RT2005 pour la station météorologique d'Alger (78). Elles correspondent à une année moyenne.

- Période rafraîchissement (ÉTÉ) On a considéré un système pour maintenir le confort d'été (climatisation).

Une surventilation naturelle de 5vol.h^{-1} est supposée la nuit, ce qui correspond à l'ouverture des fenêtres. Cette surventilation s'applique à toutes les pièces ventilées (hors garage) de 23 h à 8 h lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure.

Afin d'évaluer les performances en période caniculaire, les données météorologiques relevées à Alger en juillet et août 2010 (canicule) ont été utilisées en lieu et place des données moyennes d'Alger.

IV.3 Résultats

Pour la même structure définie précédemment nous avons effectué trois simulations de trois configurations différentes : un bâtiment ordinaire, un bâtiment passif (efficace énergétiquement) et un bâtiment passif intelligent (en plus de l'efficacité énergétique des scénarios intelligents de chauffage et de climatisation sont introduits).

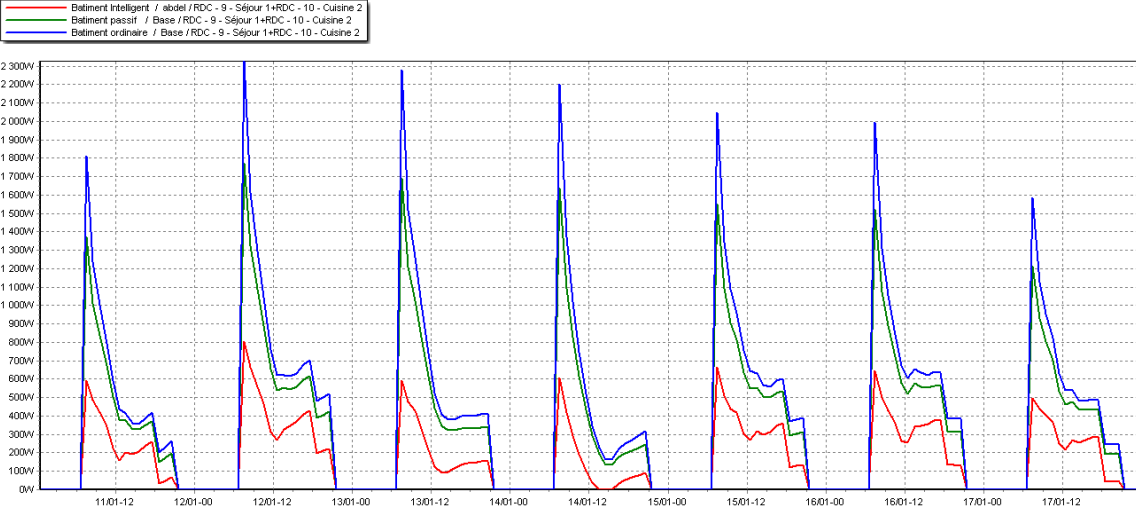


FIGURE IV.5 – Comparatif de la puissance dissipée chauffage/climatisation

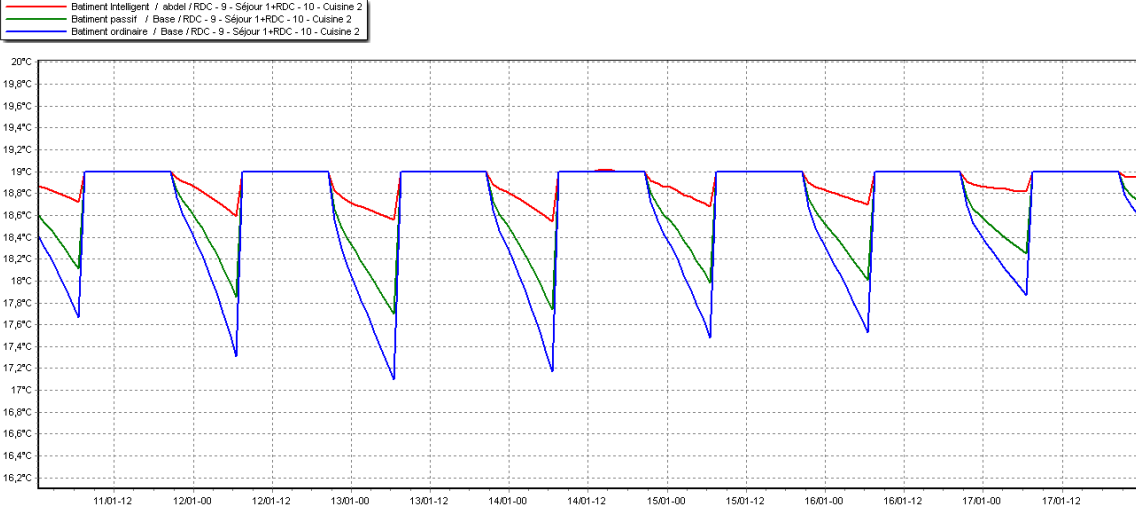


FIGURE IV.6 – comparatif du confort au sain des trois structure

Résultats

| Zones | Besoins Ch. | Besoins Ch. | Besoins Clim. | Besoins Clim. | Puiss. Chauff. | Puiss. Clim. | T° Min | T° Moyenne | T° Max |
|--|-------------|----------------------|---------------|-----------------------|----------------|--------------|----------|------------|----------|
| Année | | | | | | | | | |
| RDC - 11 - Séjour 2+RDC - 12 - Cuisine 1 | 160 kWh | 3 kWh/m ² | 342 kWh | 6 kWh/m ² | 4 925 W | 644 W | 15,25 °C | 23,66 °C | 27,00 °C |
| RDC - 6 - Bureau 1+RDC - 7 - Entrée 1+RDC - | 48 kWh | 1 kWh/m ² | 931 kWh | 28 kWh/m ² | 3 661 W | 688 W | 15,35 °C | 24,18 °C | 27,00 °C |
| RDC - 1 - Garage 1 | 0 kWh | 0 kWh/m ² | 0 kWh | 0 kWh/m ² | 0 W | 0 W | 15,61 °C | 26,46 °C | 30,78 °C |
| RDC - 9 - Séjour 1+RDC - 10 - Cuisine 2 | 115 kWh | 2 kWh/m ² | 618 kWh | 12 kWh/m ² | 4 689 W | 737 W | 15,27 °C | 23,90 °C | 27,00 °C |
| RDC - 3 - Réserve 2+RDC - 4 - Entrée 2+RDC | 54 kWh | 2 kWh/m ² | 917 kWh | 27 kWh/m ² | 3 764 W | 684 W | 15,33 °C | 24,22 °C | 27,00 °C |
| RDC - 2 - Garage 2 | 0 kWh | 0 kWh/m ² | 0 kWh | 0 kWh/m ² | 0 W | 0 W | 15,61 °C | 26,73 °C | 31,47 °C |
| R+1 - 18 - Chambre 3+R+1 - 21 - Salon 1+R+ | 182 kWh | 3 kWh/m ² | 327 kWh | 5 kWh/m ² | 6 164 W | 776 W | 15,19 °C | 23,61 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 16 - Chambre 2+R+1 - 17 - Salle de bai | 20 kWh | 1 kWh/m ² | 597 kWh | 3 kWh/m ² | 2 364 W | 483 W | 15,46 °C | 24,22 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 13 - Chambre 5+R+1 - 19 - Salon 2+R+ | 171 kWh | 3 kWh/m ² | 340 kWh | 5 kWh/m ² | 6 125 W | 772 W | 15,20 °C | 23,69 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 14 - Chambre 6+R+1 - 15 - Salle de bai | 19 kWh | 1 kWh/m ² | 602 kWh | 27 kWh/m ² | 2 377 W | 481 W | 15,46 °C | 24,24 °C | 27,00 °C |
| Total | 769 kWh | 2 kWh/m ² | 4 674 kWh | 14 kWh/m ² | 34 068 W | 5 264 W | 15,32 °C | 24,22 °C | 27,53 °C |

FIGURE IV.7 – Synthèse des résultats pour un bâtiment passif intelligent

| Zones | Besoins Ch. | Besoins Ch. | Besoins Clim. | Besoins Clim. | Puiss. Chauff. | Puiss. Clim. | T° Min | T° Moyenne | T° Max |
|---|-------------|-----------------------|---------------|-----------------------|----------------|--------------|----------|------------|----------|
| Année | | | | | | | | | |
| RDC - 11 - Séjour 2+RDC - 12 - Cuisine 1+R+ | 842 kWh | 11 kWh/m ² | 253 kWh | 3 kWh/m ² | 6 892 W | 1 097 W | 15,17 °C | 22,58 °C | 27,00 °C |
| RDC - 6 - Bureau 1+RDC - 7 - Entrée 1+RDC - | 153 kWh | 5 kWh/m ² | 342 kWh | 11 kWh/m ² | 3 270 W | 627 W | 15,32 °C | 23,01 °C | 27,00 °C |
| RDC - 1 - Garage 1 | 162 kWh | 7 kWh/m ² | 406 kWh | 17 kWh/m ² | 1 670 W | 646 W | 15,54 °C | 23,17 °C | 27,00 °C |
| RDC - 9 - Séjour 1+RDC - 10 - Cuisine 2 | 446 kWh | 9 kWh/m ² | 294 kWh | 6 kWh/m ² | 4 210 W | 799 W | 15,26 °C | 22,72 °C | 27,00 °C |
| RDC - 3 - Réserve 2+RDC - 4 - Entrée 2+RDC | 176 kWh | 5 kWh/m ² | 353 kWh | 11 kWh/m ² | 3 382 W | 651 W | 15,32 °C | 23,99 °C | 27,00 °C |
| RDC - 2 - Garage 2 | 210 kWh | 8 kWh/m ² | 407 kWh | 16 kWh/m ² | 1 784 W | 693 W | 15,52 °C | 23,04 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 18 - Chambre 3+R+1 - 21 - Salon 1+R+ | 564 kWh | 9 kWh/m ² | 278 kWh | 4 kWh/m ² | 5 531 W | 975 W | 15,20 °C | 22,61 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 16 - Chambre 2 | 3 kWh | 0 kWh/m ² | 602 kWh | 53 kWh/m ² | 793 W | 462 W | 15,96 °C | 24,04 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 13 - Chambre 5+R+1 - 19 - Salon 2+R+ | 571 kWh | 9 kWh/m ² | 298 kWh | 5 kWh/m ² | 5 472 W | 983 W | 15,20 °C | 22,64 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 14 - Chambre 6 | 3 kWh | 0 kWh/m ² | 601 kWh | 54 kWh/m ² | 776 W | 447 W | 15,93 °C | 24,01 °C | 27,00 °C |
| Total | 3 131 kWh | 8 kWh/m ² | 3 833 kWh | 10 kWh/m ² | 33 780 W | 7 380 W | 15,31 °C | 22,84 °C | 27,00 °C |

FIGURE IV.8 – Synthèse des résultats pour un bâtiment passif

| Zones | Besoins Ch. | Besoins Ch. | Besoins Clim. | Besoins Clim. | Puiss. Chauff. | Puiss. Clim. | T° Min | T° Moyenne | T° Max |
|--|-------------|-----------------------|---------------|-----------------------|----------------|--------------|----------|------------|----------|
| Année | | | | | | | | | |
| RDC - 11 - Séjour 2+RDC - 12 - Cuisine 1 | 743 kWh | 14 kWh/m ² | 268 kWh | 5 kWh/m ² | 3 828 W | 975 W | 15,28 °C | 22,42 °C | 27,00 °C |
| RDC - 6 - Bureau 1+RDC - 7 - Entrée 1+RDC - | 242 kWh | 8 kWh/m ² | 329 kWh | 10 kWh/m ² | 2 875 W | 683 W | 15,37 °C | 22,85 °C | 27,00 °C |
| RDC - 1 - Garage 1 | 78 kWh | 3 kWh/m ² | 485 kWh | 20 kWh/m ² | 1 079 W | 575 W | 15,61 °C | 23,44 °C | 27,00 °C |
| RDC - 9 - Séjour 1+RDC - 10 - Cuisine 2 | 608 kWh | 12 kWh/m ² | 347 kWh | 7 kWh/m ² | 3 742 W | 974 W | 15,28 °C | 22,52 °C | 27,00 °C |
| RDC - 3 - Réserve 2+RDC - 4 - Entrée 2+RDC | 315 kWh | 10 kWh/m ² | 408 kWh | 12 kWh/m ² | 2 942 W | 839 W | 15,36 °C | 22,76 °C | 27,00 °C |
| RDC - 2 - Garage 2 | 320 kWh | 13 kWh/m ² | 0 kWh | 0 kWh/m ² | 1 645 W | 0 W | 15,59 °C | 23,22 °C | 33,12 °C |
| R+1 - 18 - Chambre 3+R+1 - 21 - Salon 1+R+ | 706 kWh | 11 kWh/m ² | 289 kWh | 5 kWh/m ² | 4 701 W | 1 038 W | 15,21 °C | 22,47 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 16 - Chambre 2+R+1 - 17 - Salle de bai | 106 kWh | 5 kWh/m ² | 432 kWh | 20 kWh/m ² | 1 558 W | 604 W | 15,52 °C | 23,10 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 13 - Chambre 5+R+1 - 19 - Salon 2+R+ | 678 kWh | 11 kWh/m ² | 310 kWh | 5 kWh/m ² | 4 614 W | 1 037 W | 15,22 °C | 22,49 °C | 27,00 °C |
| R+1 - 14 - Chambre 6+R+1 - 15 - Salle de bai | 102 kWh | 5 kWh/m ² | 431 kWh | 20 kWh/m ² | 1 624 W | 591 W | 15,51 °C | 23,07 °C | 27,00 °C |
| Total | 3 899 kWh | 10 kWh/m ² | 3 298 kWh | 9 kWh/m ² | 28 609 W | 7 315 W | 15,34 °C | 22,71 °C | 27,40 °C |

FIGURE IV.9 – Synthèse des résultats pour un bâtiment ordinaire

On remarque clairement à travers ces simulations que le bâtiment passif intelligent est la configuration la moins énergivore tout en ayant un confort de meilleure qualité comme le montre la figure IV.6. En effet avec 773 KWh de consommation annuelle il se place loin devant les bâtiments passif et ordinaire.

Le dimensionnement des générateurs d'énergies renouvelables Pour que le bâtiment passif intelligent soit à énergie positive sera moins conséquent et donc beaucoup moins élevé en terme de coût.

Il est donc évident qu'après avoir simulé le comportements des trois types de bâtiments, le plus optimisé en terme d'énergie est le bâtiment passif intelligent, il constitue donc la meilleure solution pour intégrer les énergies renouvelables à moindre coût.

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 au secteur du bâtiment, responsables d'environ 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 bâtiment à énergie positive. Pour un tel bâtiment, la consommation globale d'énergie doit être plus faible que l'énergie qu'il produit. Il est donc nécessaire d'associer aux techniques de réduction de consommation d'énergie, des moyens de production d'énergies renouvelables et de connexion au réseau électrique pour injecter l'énergie excédentaire.

Ce travail contribue modestement dans l'établissement d'une approche méthodologique dans l'étude et la réalisation d'un bâtiment à énergie positive dans ces divers aspects.

Une étude sur les énergies photovoltaïque et éolienne a été faite pour simuler leurs comportements dynamiques face aux changements climatiques, et ce afin de synthétiser différentes commandes permettant d'extraire le maximum de puissance et de comparer leurs performances. On a pu estimer la puissance totale générée pour différentes configurations climatiques afin d'optimiser le dimensionnement des générateurs d'énergie, et ce en favorisant une source à une autre selon les caractéristiques climatiques de l'endroit où se trouve notre bâtiment. La commande de l'onduleur de manière à injecter de l'électricité au réseau avec un facteur de puissance unitaire. Finalement, le bâtiment intelligent a été modélisé en prenant en compte l'aspect physique et les différents matériaux entrant dans sa composition pour un éventuel dimensionnement des générateurs d'énergies renouvelables.

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

- Attribuer un tel travail à une équipe pluridisciplinaire composée d'ingénieurs en automatique, électrotechnique, énergétique et génie civil.
- Dimensionner d'une manière optimale les composants du système hybride éolien/photovoltaïque par un logiciel approprié spécialisé dans le calcul technique et économique pour une gestion adéquate de l'énergie et une diminution des coûts de revient.
- Implémenter les différents régulateurs synthétisés dans ce travail et dans des travaux antérieurs, dans des automates qui se chargeront aussi de la partie domotique, et ainsi bénéficier des avantages que proposent ces derniers en termes de protocoles de communication pour la supervision et la commande à distance.
- Jumeler deux approches du bâtiment que nous jugeons indissociables : le bâtiment intelligent et le bâtiment à énergie positive.
- Faire une étude économique sur les bâtiments à énergie positive en Algérie et en faire ressortir l'instant à partir duquel l'installation devient rentable.

Annexe A

Sunpower E20 333

20% EFFICIENCY

SunPower E20 panels are the highest efficiency panels on the market today, providing more power in the same amount of space

TRANSFORMERLESS INVERTER COMPATIBILITY

Comprehensive inverter compatibility ensures that customers can pair the highest efficiency panels with the highest-efficiency inverters, maximizing system output

POSITIVE POWER TOLERANCE

Positive tolerance ensures customers receive the rated power or higher for every panel

RELIABLE AND ROBUST DESIGN

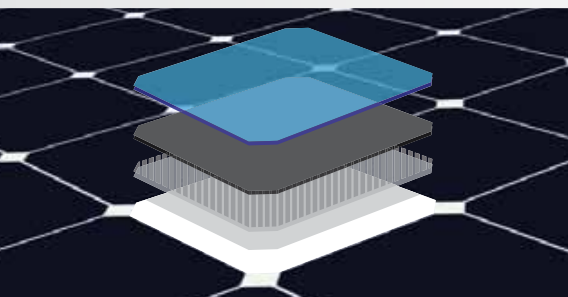
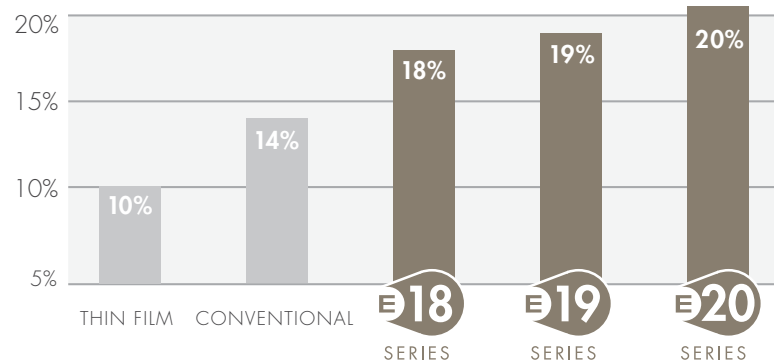
SunPower's unique Maxeon™ cell technology and advanced module design ensure industry-leading reliability



THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR™

SunPower™ E20 Solar Panels provide today's highest efficiency and performance. Powered by SunPower Maxeon™ cell technology, the E20 series provides panel conversion efficiencies of up to 20.4%. The E20's low voltage temperature coefficient, anti-reflective glass and exceptional low-light performance attributes provide outstanding energy delivery per peak power watt.

SUNPOWER'S HIGH EFFICIENCY ADVANTAGE



MAXEON™ CELL TECHNOLOGY

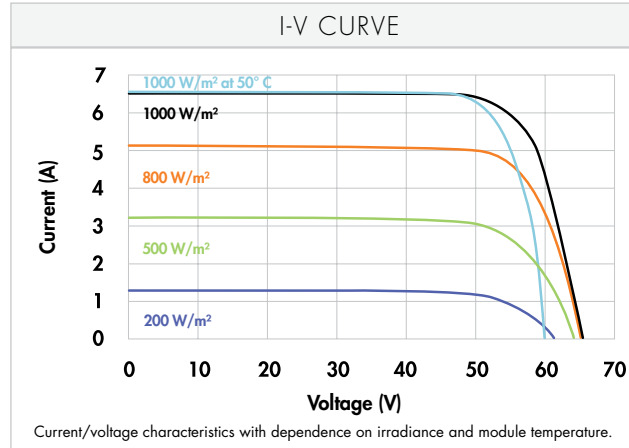
Patented all-back-contact solar cell, providing the industry's highest efficiency and reliability.



MODELS: SPR-333NE-WHT-D, SPR-327NE-WHT-D

| ELECTRICAL DATA | | | |
|--|---------------------------------|-------------|--------|
| Measured at Standard Test Conditions (STC): Irradiance 1000W/m ² , AM 1.5, and cell temperature 25° C | | | |
| Nominal Power (+5/-0%) | P _{nom} | 333 W | 327 W |
| Cell Efficiency | η | 22.8% | 22.5% |
| Panel Efficiency | η | 20.4% | 20.1 % |
| Rated Voltage | V _{mpp} | 54.7 V | 54.7 V |
| Rated Current | I _{mpp} | 6.09 A | 5.98 A |
| Open-Circuit Voltage | V _{oc} | 65.3 V | 64.9 V |
| Short-Circuit Voltage | I _{sc} | 6.46 A | 6.46 A |
| Maximum System Voltage | IEC | 1000 V | 1000 V |
| Temperature Coefficients | Power (P) | - 0.38%/K | |
| | Voltage (V _{oc}) | - 176.6mV/K | |
| | Current (I _{sc}) | 3.5mA /K | |
| NOCT | 45°C +/- 2°C | | |
| Series Fuse Rating | 20 A | | |
| Limiting Reverse Current (3 strings) | I _r | 16.2 A | |
| Grounding | Positive grounding not required | | |

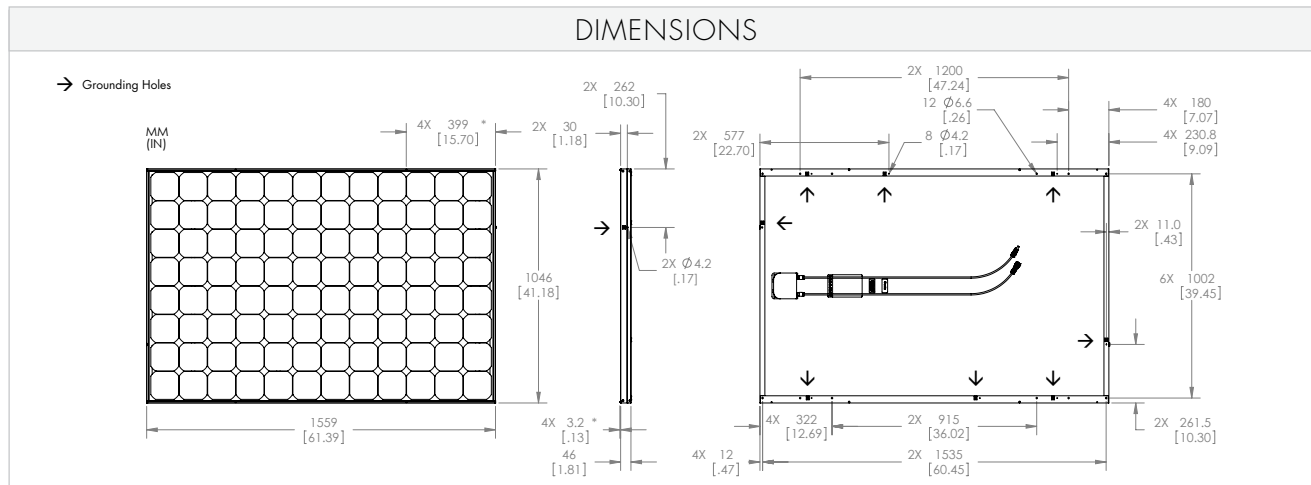
| ELECTRICAL DATA | | | |
|---|------------------|--------|--------|
| Measured at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT): Irradiance 800W/m ² , 20° C, wind 1 m/s | | | |
| Nominal Power | P _{nom} | 247 W | 243 W |
| Rated Voltage | V _{mpp} | 50.4 V | 50.4 V |
| Rated Current | I _{mpp} | 4.91 A | 4.82 A |
| Open-Circuit Voltage | V _{oc} | 61.2 V | 60.8 V |
| Short-Circuit Voltage | I _{sc} | 5.22 A | 5.22 A |



| TESTED OPERATING CONDITIONS | |
|-----------------------------|---|
| Temperature | - 40° C to +85° C |
| Max load | 550 kg/m ² (5400 Pa), front (e.g. snow) w/specified mounting configurations 245 kg/m ² (2400 Pa) front and back (e.g. wind) |
| Impact Resistance | Hail: 25 mm at 23 m/s |

| WARRANTIES AND CERTIFICATIONS | |
|-------------------------------|--|
| Warranties | 25-year limited power warranty 10-year limited product warranty |
| Certifications | IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730 (SCII) |

| MECHANICAL DATA | | | |
|-----------------|--|---------------|---|
| Cells | 96 SunPower Maxeon™ cells | Output Cables | 1000 mm cables / Multi-Contact (MC4) connectors |
| Front Glass | High-transmission tempered glass with anti-reflective (AR) coating | Frame | Anodised aluminium alloy type 6063 (black) |
| Junction Box | IP-65 rated with 3 bypass diodes 32 x 155 x 128 mm | Weight | 18.6 kg |



Please read safety and installation instructions before using this product, visit sunpowercorp.com for more details.

Annexe B

Paramètres de l'éolienne

| Paramètres de la turbine | Paramètres de la MADA |
|--|--|
| Nombre de pales : 3 | Valeurs nominales : 4.5 kW ; 220/380V-50Hz |
| Rayon de pale R = 3m | Résistance du rotor : $R_r=1.8\Omega$ |
| Inertie de l'arbre : $J_t = 0.042 \text{ kg.m}^2$ | Résistance du rotor : $R_r=1.2\Omega$ |
| Coefficient de frottement : $f = 0.017$ | Inductance cyclique statorique : $L_s= 0.1554 \text{ H}$ |
| Gain du multiplicateur de vitesse : $G = 5.4$ | Inductance cyclique rotorique : $L_r= 0.1568 \text{ H}$ |
| Puissance nominale : $P_{electrique} = 10 \text{ kW}$ | Inductance mutuelle : $M = 0.015 \text{ H}$ |
| Vitesse nominale : $\Omega_{mec} = 1500 \text{ tours/min}$ | ... |

TABLE B.1 – Paramètres de la turbine et de la MADA

Bibliographie

- [1] T. Ackermann. Wind power in power systems. *Wind Engineering*, 30(5) :447–449, 2006.
- [2] Claude MASEGOSA Alexandre GOUDINEAU. Les énergies renouvelables en algérie. mission economique ubifrance d'alger. Hydra, Alger, juillet.
- [3] P. Bacot, A. Neveu, and J. Sicard. Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment. *Revue générale de thermique*, 23(267) :189–201, 1984.
- [4] J.A. Baroudi, V. Dinavahi, and A.M. Knight. A review of power converter topologies for wind generators. *Renewable Energy*, 32(14) :2369–2385, 2007.
- [5] S. Bezzaoucha. Différentes stratégies de commande floue appliquées à une colonne d'absorption. Master's thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [6] I. Blanc. Evaluation des impacts environnementaux de filières énergie : vers une approche intégrée. 2010.
- [7] P. Borne, J. Rozinoer, J.Y. Dieulot, and L. Dubois. *Introduction à la commande floue*. Ed. Technip, 1998.
- [8] Ted K. A. Brekken and Ned Mohan. Control of a Doubly Fed Induction Wind Generator Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, 22 :129–135, 2007.
- [9] H. Bühler. *Réglage par logique floue*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.
- [10] J.P. Caron and J.P. Hautier. *Modélisation et commande de la machine asynchrone*, volume 7. Editions Technip, 1995.
- [11] R. Datta and VT Ranganathan. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 17(3) :414–421, 2002.
- [12] E. Davalo and P. Naïm. *Des réseaux de neurones*. Eyrolles, 1993.
- [13] V. Dorer and A. Weber. Air, contaminant and heat transport models : integration and application. *Energy and buildings*, 30(1) :97–104, 1999.

- [14] G. Dreyfus, J.M. Martinez, M. Samuelides, MB Gordon, F. Badran, S. Thiria, and L. Hérault. *Réseaux de neurones : méthodologie et applications*, volume 2004. Eyrolles Paris, 2002.
- [15] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 20(4) :963–973, 2005.
- [16] B. François and J.P. Hautier. Commande d’un onduleur triphasé de tension par modulateur de largeur et de position d’impulsions. *Revue Internationale de Génie Electrique*, 2(3) :359–387, 1999.
- [17] O. Gergaud. *Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. PhD thesis, École Normale Supérieure de Cachan, 2009.
- [18] J. Godjevac. *Idées nettes sur la logique floue*. PUR presses polytechniques, 1999.
- [19] M.T. Hagan, H.B. Demuth, M.H. Beale, and Boulder University of Colorado. *Neural network design*. PWS Pub, 1996.
- [20] S. Heier and R. Waddington. Grid integration of wind energy conversion systems. *published Nov*, page 118, 1998.
- [21] S. Kessler and F. Kasser. Effet des lois cantonales sur l’énergie. *combustion*, 2 :0–85, 2008.
- [22] J. Lesenne, F. Notelet, and G. Séguier. *Introduction à l’électrotechnique approfondie*. Technique et documentation, 1981.
- [23] R. Leyva, C. Alonso, I. Queinnec, A. Cid-Pastor, D. Lagrange, and L. Martinez-Salamero. Mpppt of photovoltaic systems using extremum-seeking control. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 42(1) :249–258, 2006.
- [24] J.P. LOUIS. Modèles pour la commande des actionneurs électriques (traité egem, série génie électrique). *Recherche*, 67 :02, 2004.
- [25] S. Mathew. *Wind energy : fundamentals, resource analysis and economics*. Springer Verlag, 2006.
- [26] A. Mirecki. Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. 2005.
- [27] M. Mokhtari and M. Marie. Applications de matlab 5 et simulink 2, 1998.
- [28] S. Muller, M. Deicke, and R.W. De Doncker. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *Industry Applications Magazine, IEEE*, 8(3) :26–33, 2002.
- [29] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, and H.B. Ahmed. Aérogénérateurs électriques. *Techniques de l’Ingénieur*, 2004.
- [30] P. Nema, RK Nema, and S. Rangnekar. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and pv-solar : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8) :2096–2103, 2009.

- [31] L. Øie, H. Stymne, C.A. Boman, and V. Hellstrand. The ventilation rate of 344 oslo residences. *Indoor Air*, 8(3) :190–196, 1998.
- [32] L.N. Paquin. *Application du backstepping à une colonne de flottation*. 2001.
- [33] K.M. Passino and S. Yurkovich. *Fuzzy control*. Citeseer, 1998.
- [34] D. Pinon, M. Fadel, and T. Meynard. Commande par mode de glissement d’un hacheur à deux cellules. *Modélisation et commande des entraînements électriques EPE*, 99(5) :1, 2002.
- [35] F. Poitiers. Etude et commande de generatrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie eolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. 2003.
- [36] A. Rabl, A. Benoist, D. Dron, B. Peuportier, J.V. Spadaro, and A. Zoughaib. How to account for co 2 emissions from biomass in an lca. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5) :281–281, 2007.
- [37] F. Minne B. Robyns S. El Aimani, B. François. Comparison analysis of control structures for variable wind speed turbine. Lille, France, Juillet 2003. Proceedings of CESA 2003.
- [38] T. Salomon, R. Mikolasek, and B. Peuportier. Outil de simulation thermique du bâtiment, comfie. *Journée thématique SFT-IBPSA, La Rochelle*, 2005.
- [39] O. SIDLER. Rénovation à basse consommation d’énergie des logements en france. *Projet” Renaissance”*, *Programme européen CONCERTO*, page 81, 2007.
- [40] F. SORIN, L. BROUSSARD, and P. ROBLIN. Régulation d’un processus industriel par réseaux de neurones. *Techniques de l’ingénieur. Informatique industrielle*, 6(S7582) :R7582–1, 2001.
- [41] Y.T. Tan, D.S. Kirschen, and N. Jenkins. A model of pv generation suitable for stability analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(4) :748–755, 2004.
- [42] S. Thiers. Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive. *Renewable energy*, 32(5) :845–855, 2008.
- [43] Stéphane THIERS. *Bilans énergétiques et environnementaux de batiments à énergie positive*. Mémoire de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris, Novembre 2008.
- [44] P. Vas. *Sensorless vector and direct torque control*, volume 729. Oxford university press Oxford, UK, 1998.
- [45] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 :1198–1208, 2009.
- [46] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. In *Brazilian Power Electronics Conference*, pages 1244–1254, 2009.

- [47] W. Xiao, W.G. Dunford, and A. Capel. A novel modeling method for photovoltaic cells. In *Power Electronics Specialists Conference, 2004. (PESC) IEEE 35th Annual*, volume 3, pages 1950–1956.
- [48] W. Xiao, N. Ozog, and W.G. Dunford. Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 54(3) :1696–1704, 2007.
- [49] A.S. Yearbook and N. Africa. Ouvrages sur le développement diffusés en france octobre 2004-mai 2005. *Revue tiers-monde*, 46(182) :449, 2005.
- [50] Zakaria. ZIADI. Commande hybride d’une maison à energie positive. Master’s thesis, 2010.