



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah  
Faculté des sciences Dhar El Mehraz  
Centre d'études doctorales "sciences et  
technologies"  
Fès, Maroc



## Thèse

En vue de l'obtention du titre de : **Docteur**

Spécialité : **Génie électrique**

Laboratoire d'électronique, Signaux-Systèmes et Informatique

Présentée par :

**Omar DAHHANI**

# Optimisation et commande d'un système énergétique renouvelable hybride

Soutenue le 03/11/2018 devant le jury composé de :

Pr.	Faculté	Président
Pr.	Faculté	Rapporteur
Pr.	Faculté	Rapporteur
Pr.	Faculté	Rapporteur
Pr.	Faculté	Examineur
Pr.	Faculté	Examineur
Pr.	Faculté	Directeur de thèse

## Remerciements

### **Remerciements**

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Electronique, Signaux-Systèmes et d'Informatique (LESSI), à la Faculté des Sciences Dhar-El Mehraz (FSDM), Université Sidi Mohammed Ben Abdellah de Fez (USMBA). Le Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre (GREAH) en France est à remercier pour les facilités accordées à Omar DAHHANI pour la concrétisation de ses travaux de Thèse.

Je veux remercier ici tous ceux qui ont contribué à la réussite de ces travaux. En premier lieu, je souhaiterais remercier l'ensemble des membres de mon jury de thèse pour le riche débat scientifique du 3 novembre 2018. Je tiens ainsi à remercier Monsieur EL BAKKALI Chakib professeur à la FSDM de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Je remercie également mes rapporteurs, Messieurs les Professeurs BROURI Adil, ROUKHE Ahmed et TISSIR El Houssaine respectivement Professeurs à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Meknès, la Faculté des Sciences de Meknès et la FSDM de Fez. Leurs remarques pertinentes ont permis d'améliorer de manière significative la qualité de mon manuscrit. En outre, je remercie mes examinateurs Messieurs EL JOUNI Abdeslam, ABARKAN Mostafa et KABBAJ Mohammed Nabile respectivement Professeurs du Centre Régional des Métiers d'Education et de Formation de Tanger, la Faculté Polydisciplinaire de Taza et la FSDM de Fez.

Je tiens, en particulier à remercier Monsieur BOUMHIDI Ismail Professeur à la FSDM, pour avoir accepté la lourde tâche de diriger ma thèse mais avant tout pour son aide et ses encouragements réguliers. Ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation. Je suis profondément reconnaissant à Monsieur BOUMHIDI Jaouad, Professeur à la FSDM, car il a été l'élément déclencheur de ma thèse.

Mes remerciements s'accords également à tout le staff académique et administratif qui m'a accueilli durant la période de mon stage de recherche en France, en particulier Monsieur Cristian NICHITA, professeur des universités à la faculté des sciences et technologies du Havre et Madame Martine CURRIE, responsable du service des relations internationales.

Mes remerciements vont également à mes collègues de travail pour la bonne ambiance. Un très grand merci à tous ceux qui m'ont soutenu ou qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

*Je dédie ce travail à mes parents qu'Allah les garde;*

Ma chère mère Houria OUTSKI

Mon cher père Monsieur Bouabid DAHHANI

*A mes chers frères qu'Allah les garde ;*

Mon cher frère Adil DAHHANI

Mon cher frère Abdessamad DAHHANI

Mon cher frère Maroïne DAHHANI et son petit Saad DAHHANI

*A toute ma famille ;*

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ

### **Résumé de la thèse:**

La commande des processus instables demeure une tâche difficile à accomplir, notamment les systèmes de production de l'énergie renouvelable. Le présent travail de thèse aborde le sujet de la commande de ces types de systèmes. Que ce soit système photovoltaïque, éolienne ou hydrolienne, notre conception de la technique SVM a donné solution à ces commandes. Dans un premier temps, nous avons abordé la commande par mode glissant à base de SVM qui a résolu les problèmes d'incertitudes. Puis, on a proposé une nouvelle stratégie plus efficace qui se base sur la commande directe par SVM combinée à la technique P&O adaptative. Ces travaux sont destinés pour les systèmes de pompage photovoltaïques (amélioration). Après, nous avons abordé les commandes SVM des systèmes éoliennes et hydroliennes. La création d'une nouvelle commande en boucle ouverte par SVM qui surpasse les autres commandes existantes en terme de précision, rapidité et rendement. Le présent travail focalise sur la création d'un micro réseau dont l'ossature sera les trois énergies citées auparavant. Cela nous permet une étude profonde dans la sommation de ces trois énergies pour l'exploitation locale ou le balancement d'un surplus sur le circuit national. Vu le succès réalisé par la commande SVM, cette dernière sera conçue pour les systèmes d'injection énergétique au réseau.

### **Thesis abstract:**

Controlling unstable processes remains a difficult task, especially renewable energy systems. The present thesis work addresses the subject of the control of these types of systems. Whether photovoltaic system, wind turbine or tidal turbine, our design of the SVM technique has given solution to these controls. First, we approached the SVM - based sliding mode control which solved the problems of uncertainty. Then, we propose a new, more efficient strategy based on SVM direct control combined with the adaptive P & O technique. This work is intended for photovoltaic pumping systems (improvement). Thereafter, we discussed the SVM controls for wind and tidal systems. The creation of a new open loop control by SVM that outperforms the other existing controls in terms of accuracy, speed and performance. The present work focuses on the creation of an electrical micro-network whose backbone will be the three energies mentioned before. This allows us a deep study in the summation of these three energies for the local exploitation or the swaying of a surplus on the national circuit. Seeing the success achieved by the SVM control, the latter will be designed for the control of the grid energy injection systems.

## REFERENCES PERSONNELLES

### Publications internationales :

- Omar DAHHANI, Abdesslam El-Jouni and Ismail Boumhidi "Assessment and control of wind turbine by support vector machines" *Sustainable Energy Technologies and Assessments, Netherlands*, 27 (2018) 167–179.
- Omar DAHHANI, Bouchera SEFRITI, Abdesslam El-Jouni and Ismail Boumhidi "Sliding mode control for photovoltaic water pumping system based on support vector machines" *Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation*, Switzerland, Vol. 8, No. 4, 2016.
- Omar DAHHANI, Abdesslam El-Jouni and Ismail Boumhidi " Torque control of a marine current turbine by the least square support vector machines " accepted in the “*International Journal of Power and Energy Systems*”, (ACTA press publisher), 2018, Canada.
- Omar DAHHANI and Ismail Boumhidi " Intelligent perturb and observe control based on support vector machine for photovoltaic pumping system " accepted in the “*International Journal of Modelling, Identification and Control*”, 2018, UK.

### Communications Internationales :

- Omar Dahhani, Abdeslam El Jouni, Bouchra Sefriti, & Ismail Boumhidi, “Optimal perturb and observe control for MPPT based on least square support vector machines algorithm” *The 1<sup>st</sup> IEEE International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV15)*, IEEE, Fez-Morocco, 25-26 March 2015.
- Omar Dahhani, Ismail Boumhidi, Jerry Tekobon, and Cristian Nichita, “Wind power system control based on least square support vector machines algorithms,” In *the 16<sup>th</sup> IEEE conference ‘Environment and electrical engineering international conference’ EEEIC’ 16*, Florence, Italy, June 2016.
- Omar Dahhani, Bouchra Sefriti, Abdeslam El Jouni & Ismail Boumhidi, ‘Maximum power point tracking for a photovoltaic water pumping system with sliding mode control and fuzzy wavelet network’ à la conference ‘*Intelligent systems and computer vision’ International IEEE conference, Fez, Morocco* march 2015.
- Omar Dahhani, Ismail Boumhidi, Ferhat Chabour, and Cristian Nichita, ‘Backstepping maximum power point tracking controller for a photovoltaic water pumping system’ à la conference ‘*Energy systems conference 2016: 21<sup>st</sup> century challenges*’, Westminster, London, UK.

**SOMMAIR**

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَمَّ الصَّالِحَاتُ.....	3
INTRODUCTION GENERALE.....	9
CHAPITRE 1 :.....	15
Etat de l'art des systèmes de production des énergies renouvelables. ....	15
1. Introduction.....	15
2. Energie solaire photovoltaïque.....	16
2.1. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	18
2.2. Protection classique d'un générateur photovoltaïque.....	20
3. Energie éolienne.....	21
3.1. Description d'une éolienne.....	22
3.2. Les bases de conversion de l'énergie éolienne.....	23
4. Energie de la marée.....	25
4.1. Physique de la marée.....	25
4.2. Ressources.....	26
4.3. Projet et concept des turbines marines.....	27
5. Utilisation de l'énergie renouvelable.....	28
5.1. Architecture d'une centrale de l'énergie photovoltaïque.....	28
5.2. Architecture de l'éolienne.....	30
6. Conclusion.....	32
CHAPITRE 2 :.....	33
Etat de l'art des commandes des systèmes à énergies renouvelables.....	33
1. Introduction.....	33
2. Commande des systèmes énergétiques renouvelables.....	33
2.1. Commande des systèmes photovoltaïques.....	33
2.2. Commande des systèmes éoliens.....	36
3. Méthodes classiques des commandes utilisées aux énergies renouvelables.....	37
3.1. Commande par la méthode de OCV et SCC.....	37
3.2. Commande par la méthode de perturbation et d'observation.....	37
3.3. Commande par mode glissant.....	37
3.4. Commande par backstepping.....	41
4. Méthodes d'intelligence artificielle.....	45
4.1. Méthode de réseaux de neurones.....	45
4.2. Méthode de la logique de Fuzzy.....	48
4.3. Méthode de séparateur à vaste marge (SVM).....	51
5. Conclusion.....	56

CHAPITRE 3 :	58
Commande d'un système de pompage photovoltaïque	58
1. Introduction	58
2. Système de pompage photovoltaïque	59
2.1. Le modèle du générateur PV (GPV)	59
2.2. Le hacheur (convertisseur DC/DC)	60
2.3. Moteur à courant continu	61
2.4. La pompe centrifuge	62
2.5. Modèle mathématique du système de pompage photovoltaïque	62
3. Commande des systèmes à structure variable à base des SVM	63
3.1. Commande par backstepping	63
3.2. Modèle mathématique incertain du système de pompage photovoltaïque	65
3.3. Commande par mode glissant standard d'un système incertain	66
3.4. L'identification des incertitudes de modélisation par la méthode des SVM	67
3.5. Commande d'un système incertain par mode glissant à base des SVM	69
4. Commande par la méthode de P&O adaptative à base des SVM	73
4.1. De la commande de P&O standard à la commande adaptative	73
4.2. Modélisation du PPM du système PV par la méthode SVM	74
4.3. Commande par la méthode de P&OA à base de SVM	75
5. Conclusion	81
CHAPITRE 4 :	82
Commande d'un système éolien / hydrolienne	82
1. Introduction	82
2. Commande d'un système éolien	83
2.1. Modélisation du système éolien	83
2.2. La stratégie de commande par mode glissant	85
2.3. Commande par SVM	87
3. Testes, simulations et discussion	96
3.1. Test au vent normal théorique	97
3.2. Test au vent fort théorique	100
3.3. Test au vent réel	102
4. Résultats d'application de la commande SVM sur les éoliennes	105
5. Commande d'une hydrolienne	106
5.1. Modélisation des ressources de la marée	107
5.2. Résultats de simulation	111
6. Conclusion	113
CHAPITRE 5 :	115

## Table des matières

Commande d'un système d'énergie renouvelable hybride .....	115
1. Introduction .....	115
2. Energie solaire injectée au réseau électrique .....	115
2.1. Energie photovoltaïque pour des applications monophasées (domestique) .....	116
2.2. Energie photovoltaïque injectée au réseau triphasé.....	122
3. Energie éolienne/hydrolienne injectée au réseau électrique .....	130
3.1. Modélisation d'un système éolien.....	130
3.2. Commande du système éolien .....	133
3.3. Résultats de simulation.....	138
4. hybridation des sources énergétiques renouvelables.....	140
5. Conclusion et perspective de la commande par SVM.....	141
Conclusion générale .....	143

## INTRODUCTION GENERALE

Le besoin du monde entier en énergie oblige les chercheurs à se joindre au consensus de la transformation énergétique. L'énergie renouvelable est considérée plus que jamais, leur meilleur choix vers l'exploitation de nouvelles sources modernes, fiables et plus propres. Cette tendance est une cause de l'épuisement continu des produits énergétiques fossiles et des nouvelles réglementations climatiques mondiales visant l'atténuation de la pollution et du réchauffement climatique terrestre, et d'autre part de la maturité croissante du marché de l'énergie renouvelable et du progrès technologique et technique.

Parmi les solutions les plus envisagées ; l'énergie d'origine solaire et l'énergie du vent. La particularité du solaire est caractérisée par la disponibilité abondante dans tous les coins du monde. L'intérêt de cette énergie a grandi exponentiellement ces dernières années suivant les deux axes ; solaire photovoltaïque et solaire thermique. Par ailleurs, l'énergie du vent largement connue sous le nom 'énergie éolienne', est caractérisée par sa fiabilité et sa durabilité est souvent exploitée en central de production. Les investissements éoliennes sont toujours menés par les états et les grandes entreprises ou des groupes formants les grandes entreprises.

Les méthodes et les outils efficaces de production sont alors nécessaires pour mettre en œuvre ces perspectives. Le présent travail de recherche de cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances et du rendement énergétique des différents systèmes de production d'énergies renouvelable existantes. Il contribue également à l'élaboration des lois de commandes permettant l'optimisation de la conversion des différentes énergies renouvelables sous forme mécanique ou rayonnement en une énergie électrique pour différents appareillages électriques. Ces commandes doivent faire face aux différentes variations climatiques perturbants le système de production et doit aussi maintenir sa stabilité souhaitée. On veut mettre en évidence ce mot stabilité puisqu'on a affaire à un débit qui est soumis à toutes variations naturelles ce qu'on appelle un débit libre. On cite un petit exemple : dans le cas d'une chaudière à carburant conventionnel (fuel, charbon, etc..) on peut contrôler et régler toutes les grandeurs physiques en amont (pression, fuel et l'air) pour avoir un débit laminaire de vapeur qui attaque un turbo-alternateur produisant de l'énergie électrique. On remarque que dans une telle énergie conventionnelle toutes les grandeurs citées ultérieurement sont contrôlables, en revanche, dans un système dans lequel on ignore toutes les valeurs d'entrées du processus en amont (vitesse d'air qui attaque une éolienne, courant d'eau qui attaque une hydrolienne, densité de rayonnements solaire projetées sur des panneaux solaire etc) et qu'on ne peut pas commander, on doit s'appuyer sur des systèmes de stabilisation pour avoir une sortie d'énergie réglée et stabilisée. Autrement,

une défaillance de stabilité sur n'importe quel motif peut causer des dégâts de conséquences graves.

La qualité de l'énergie produite est un critère clé dans la conception de la commande. Bien qu'il y a une multitude de méthodes de commande proposée dans la littérature scientifique, chacune présente des exigences d'application ; la flexibilité vis à vis les changements climatiques, le niveau de vibration lors l'application, et le niveau d'accessibilité pour la maintenance. La nature des systèmes de conversion de l'énergie renouvelable est souvent non linéaire alors que les commandes classiques destinée aux systèmes linéaires ne sont plus convenables. Chaque source d'énergie renouvelable a des spécificités, pour cela on trouve chaque type d'énergie a ses propres méthodes de commande partageant un même objectif mais des outils et des stratégies différentes. Cette thèse va couvrir l'étude des commandes des énergies issues des trois sources naturelles soleil-vent-mer.

### *Energie solaire*

L'objectif primordial dans l'énergie solaire photovoltaïque est la maximisation de l'énergie électrique continue issue après la conversion de l'irradiation solaire. Pour atteindre cet objectif, il y a des méthodes simples à appliquer. Ces méthodes se basent sur la contre réaction du voltage et du courant ; ex. la méthode du voltage du circuit ouvert [Rei-13] (open circuit voltage OCV) et la méthode de court-circuit [Nog-02] (short circuit current SCC). L'implémentation de ces deux techniques apparaissent simples et économiques, mais elles sont limitées à la poursuite du point de puissance maximale (PPM). Le fonctionnement du OCV se base sur une relation estimée entre la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque et la tension de fonctionnement optimal. Le fonctionnement du SCC est similaire à celui de OCV, la relation ici est entre le courant de court-circuit et le courant de fonctionnement optimal. Il existe des méthodes qui semblent relativement compliquées et demandent des dispositifs électroniques qui supportent l'algorithme de commande. Par exemple les méthodes de "hill climbing" (HC) [Kja-12], "incremental conductance" (IC), [Xia-04] [Rad-14] et la méthode de "perturber et observer" (perturbe and observe) [Sha-12] et [Elg-12], mènent les systèmes aux modèles mathématiques inconnues vers leurs points de fonctionnement optimal. Ces méthodes sont largement utilisées vue le rapport satisfaisant simplicité/performance. En plus d'un taux de convergence faible, le problème commun de ces méthodes est l'apparition des oscillations au régime stationnaire. Les commandes par mode glissant (sliding mode control SMC) [Dah-16] et par Backstepping [Abo-11] sont connues par leurs performances élevées lorsque le modèle mathématique du système étudié est bien précis. Les exigences d'application de ce type de méthode sont nombreuses surtout en terme de mesure qui est dans la plus part du temps incertaines. Pour rattraper ces incertitudes, un gain de commutation qui entre dans la conception de la commande doit être toujours choisi suffisamment élevé proportionnellement aux incertitudes. Cela crée un phénomène des hautes

fréquences dit de réticence (chattering phenomenon). Pour le rattrapage de ces limitations, les chercheurs ont fait recours à des techniques de l'intelligence artificielle (artificial intelligence AI) comme les réseaux des neurones et la logique floue [Ben-15]. Plusieurs recherches actuelles adoptent des algorithmes d'AI pour dépasser les problèmes classiques rencontrés dans les sujets de la commande des systèmes photovoltaïques. Cette intégration se fait soit par la combinaison des méthodes classiques citées ultérieurement [Rad-14] et [Sah-13] ou bien par la conception des nouvelles commandes par les algorithmes intelligents [Kas-12] et [Ben-14].

Bien que les AI aident à la résolution de plusieurs problèmes de mesure et d'estimation, ces techniques sont bien connues par leurs demandes aux supports numériques spécifiques et puissants. La technique des supports à vaste marge (support vector machine SVM) est une exception des techniques d'AI. La technique SVM apparue puissante en classification avant qu'elle soit appliquée pour l'estimation, l'identification des comportements des systèmes et la reconnaissance des sens [Vap-95] et [Suy-99]. Cette dernière comparée aux réseaux de neurones et à la logique floue présente une haute performance d'estimation. La philosophie de cette méthode consiste à projeter les données d'entrée de dimension naturelle en un espace d'une dimension supérieure. De cette façon, la séparation des données qui sont non-séparables auparavant à la dimension naturelle devient possible à cette nouvelle dimension augmentée. La reproduction de la solution dans l'espace naturel se fait par l'introduction de la fonction noyau (kernel function) qui est choisie suivant le type de problème traité. Cette méthode est choisie dans cette thèse pour la conception de nouvelles commandes destinées pour les systèmes photovoltaïques. Les problèmes éternels rencontrés dans les commandes par mode glissant et par PO vont être surmontés avec différentes façons.

### *Energie éolienne et hydrolienne*

L'énergie éolienne est actuellement la source énergétique la plus fiable qui a un immense impacte mondial [Pis-17]. Néanmoins, la nature aléatoire du vent gêne ou empêche le bon fonctionnement. Suivant la gamme de vitesse du vent, une seule éolienne doit avoir différentes commandes. La maximisation de puissance (maximum power point tracking MPPT) se fait en dessous du régime nominale. Plusieurs études de recherche ont proposés des schémas de commande à la littérature et des stratégies innovantes pour rendre la tâche du MPPT plus facile. Cette dernière peut se réaliser en deux façons ; soit d'une manière directe où la maximisation se fait sur la puissance de sortie ou bien sur la puissance mécanique d'entrée dans le cas indirect. La méthode de la commande par la vitesse spécifique de l'éolienne (tip speed ratio TSR) est la plus connue parmi les méthodes indirectes [Gan-14]. Cette méthode est établie par un rapport approché entre la vitesse du vent et le couple mécanique résistant optimale que la turbine oppose. Les méthodes directes comme HC [Tan-97], IC [Yu-15] et PO [Ahm-13] s'appliquent aussi en énergie éolienne. Les études se focalisent sur la taille du pas de l'évolution de ces méthodes. Ce pas doit être conçu

## Introduction générale

d'une manière adaptative pour poursuivre les changements brusques à la vitesse du vent. D'un point de vue théorique, les commandes par mode glissant et par backstepping s'appliquent au système éolien, mais au niveau pratique, plusieurs problèmes apparaissent surtout aux prélèvements des mesures et à l'installation de nouveaux capteurs dans des endroits inaccessibles dans le corps de l'éolienne. La transition vers les nouvelles techniques d'IA augmente exponentiellement. Néanmoins, ces études se font sous le régime nominal alors que le comportement du vent est imprévisible, et peut même parcourir les quatre zones de fonctionnement dans un laps de temps.

Les commandes qui couvrent toutes les gammes de vitesse sont remarquablement absentes dans la littérature. Ce qui nous amène à proposer une nouvelle stratégie de commande complète couvrant toutes les zones de fonctionnement. Cette dernière est conçue par la méthode du SVM est mise dans un cadre pratique pour faciliter l'implémentation par la suite.

Avec une structure similaire à celle de l'éolienne, les chercheurs ont élaborés une machine de production de l'énergie de la marée appelée hydrolienne. Cette dernière permet l'extraction de l'énergie à base de la marée dans différents endroits ; fleuve, mer, étroit, etc. L'avantage de cette énergie est l'abondance et la disponibilité malgré l'emplacement difficile de la machine en générale. Lorsqu'elle est émergée, l'hydrolienne transforme le mouvement d'écoulement d'eau à un mouvement mécanique rotatif actionnant un arbre d'une génératrice produisant une énergie électrique. Une commande par SVM est adoptée pour couvrir aussi les hydroliennes.

Les énergies renouvelables sont volatiles, dépendent en grande partie de leur environnement qui ne cesse de changer. Un tel changement est considéré comme une limitation, tandis que la fourniture d'énergie est nécessaire en mode ininterrompu. Le renforcement d'une seule source d'énergie accentue fortement la perturbation d'un réseau électrique. Le stockage de l'énergie demeure un choix difficile à réaliser techniquement ainsi que financièrement. La diversification des sources d'énergies renouvelables est une solution à promouvoir puisqu'elle pourra assurer un niveau minimum d'énergie, ce qui s'appelle énergie renouvelable hybride ou bien énergie renouvelable multi-sources. Le travail de cette thèse a pour but l'étude des différents systèmes énergétiques ultérieurement cités (photovoltaïque, éolienne et hydrolienne) mène à l'étude d'un système hybrides.

La structure de ce rapport de thèse est comme suite ; Le premier chapitre est dédié à l'état d'art des systèmes énergétiques renouvelables. Il décrit les différents systèmes énergétiques utilisés. Le deuxième chapitre est consacré à la description des différentes commandes utilisées dans le domaine des énergies renouvelables. Dans le même chapitre nous avons abordé l'aspect théorique des commandes destinées aux systèmes à structures variables, comme la commande par backstepping et par mode glissant. Les techniques d'intelligence artificielle tel que la logique

## Introduction générale

floue, les réseaux de neurones ou la technique des séparateurs à vaste marge (support vector machines SVM) sont aussi abordées.

Le troisième chapitre est constitué de deux grandes parties, la première partie est dédiée à la modélisation du système photovoltaïque de pompage d'eau pour le mettre en représentation d'état. Ensuite, une commande par backstepping est proposée pour maximiser l'extraction d'énergie et puis augmenter le rendement du système de pompage pour différentes conditions climatiques. Le modèle mathématique d'un système solaire réel va contenir forcément des incertitudes dues aux mesures incertaines et aux termes négligés pendant la modélisation. Un algorithme SVM est conçu dans le but d'identifier ces incertitudes. La partie incertaine identifiée du modèle mathématique va être prise en compte dans l'élaboration d'une nouvelle commande par mode glissant résistante aux incertitudes.

Vue le succès marqué par la méthode P&O surtout dans le domaine pratique, nous tentons d'introduire des améliorations au niveau des trois points faibles ; convergence lente, faible stabilité, oscillations à l'état d'équilibre. Tout en gardant les points forts de la méthode qui ne demandent ni modèle mathématique du système ni matériels spécialisés. Cette fois nous formulerons l'algorithme des SVM pour l'estimation du pas d'évolution de la méthode PO à chaque changement brusque d'irradiation. Cela va améliorer le temps de convergence et force la stabilité quels que soient les changements climatiques subits. Par ailleurs, les oscillations autour du point de puissance maximal sont résolues par le choix d'un pas d'évolution adaptatif.

Le quatrième chapitre est constitué de deux parties, la première est destinée au système éolien et la deuxième pour l'hydrolienne. Au début de ce chapitre on entame la modélisation mécanique d'une éolienne à deux masses. Par la suite une commande par mode glissant est élaborée et la stabilité est prouvée pour le but d'être comparée avec une nouvelle commande par SVM. Cette dernière a prouvé un succès incontournable théoriquement et pratiquement. L'éolienne commandé par SVM est testé par un profil de vent réel de la région de Tétouan et les résultats ont été satisfaisant en terme de taux de convergence et de la stabilité au vent fort.

Après la satisfaction de la méthode SVM sur les éolienne, une stratégie de commande pareille est conçue pour l'hydrolienne dans la deuxième partie du chapitre. Les recours marines sont modélisées et utilisées à la validation.

Le dernier chapitre contiendra les trois types d'énergies et leur injection aux réseaux électriques. Ce chapitre est divisé en trois parties ; la première contiendra la modélisation et la commande par mode glissant d'un système photovoltaïque qui injecte l'énergie aux réseaux électriques domestiques. La deuxième partie est dédiée à l'injection de l'énergie électrique issue de l'éolienne et de l'hydrolienne au réseaux alternatif triphasé. Pour ce fait, une chaîne de différents

## Introduction générale

convertisseurs et de régulateurs est modélisée et commandée. A la dernière partie du chapitre on présente l'hybridation des trois sources d'énergie renouvelable en étude.

## CHAPITRE 1 :

# Etat de l'art des systèmes de production des énergies renouvelables.

### 1. Introduction

L'innovation technologique, ainsi que l'engagement politique ont menés à la baisse remarquable du coût des technologies de l'énergie renouvelable. Ces dynamisme ont permis aux énergies vertes depuis 2012 de dépasser la croissance des technologies conventionnelles installées (118 GW renouvelable contre 117 GW non renouvelable). En 2015 l'énergie produite a dépassée 23% de la production énergétique mondiale, dans laquelle le solaire photovoltaïque partage 47 GW et l'éolienne 66 GW [Ret-17].

Un système hybride peut être composé de plusieurs sources d'énergie renouvelable(soleil, vend, eau,...etc.). Le solaire photovoltaïque est actuellement l'énergie qui connaît le taux d'expansion le plus élevée grâce à la chute du prix d'investissement et aussi à l'augmentation du rendement des générateurs photovoltaïque. La technologie la plus répandue est la plaquette du Silicium mono- ou poly-cristallin qui a le rendement le plus élevé, actuelle entre 21% et 23% (la limite théorique 29%)(2016). Cette technologie couvre plus de 93% des photovoltaïques installées tandis qu'il ya d'autres technologies à base des films minces du silicium amorphe (a-Si), du sélénium de gallium et d'indium de cuivre (CIGS) ou bien à base du Tellure de cadmium (CdTe) qui est considéré chère et toxique. D'autres technologies émergentes comme la concentration photovoltaïque (CPV), qui se base sur des concentrateurs / lentilles optiques de poursuite du soleil qui converge la lumière directe du soleil sur des cellules solaires empilées et hautement efficaces avec un rendement théorique proche de 50%. Cela peut réduire la quantité demandé des générateurs photovoltaïques et la zone d'installation. Les Pérovskites sont des composés organiques à structure cristalline et qui sont peu coûteux à produire. Leurs taux de conversion à dépassé 21% en 2016 (moins de 4% en 2009). Les recherches continuent à résoudre les problèmes liés à la durabilité et à la sensibilité de l'eau [Gri-16].

Parmi les différentes sources d'énergies, l'éolienne occupe la plus grande importance. C'est une énergie prometteuse en terme de potentiel et d'écologie. Précédé par l'énergie hydraulique (58%), l'énergie éolienne est estimée par 23% de la somme des énergies renouvelables exploitées. De faite de sa fiabilité et de la souplesse de sa mise en œuvre, il en existe de différentes tailles qui conviennent à la puissance demandé, allant de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts, ce qui rend son champs d'application relativement vaste. La turbines éolienne est catégorisée

généralement par son axe horizontale ou verticale, son installation on-shore ou off-shore et par sa vitesse de rotation fixe ou variable. Mais le type le plus populaire qui a un rendement aérodynamique théoriquement élevé est celui avec un axe horizontale et trois pales à vitesse de vent variable allant de 3 jusqu'au 27 mètres par seconde. Ce type peut être classifié lui-même au différentes catégories concernant le placement du rotor(en amont ou en aval de la nacelle), la génératrice utilisée (machine synchrone ou asynchrone), l'existence de la boîte à vitesse et la conception de la commande [Lev-17].

## 2. Energie solaire photovoltaïque

Le phénomène photovoltaïque est une propriété intrinsèque de quelques matériaux qui leurs donne l'habilité de convertir l'énergie de la lumière à une énergie électrique, notamment le silicium. Ce matériau semi-conducteur est homogène, stable, non toxique et abondant sur dans la nature. Les électrons dans un matériau semi conducteur ne circulent que s'ils sont soumis à une énergie susceptible de les libérer de leurs atomes. Il existe deux niveaux d'énergies très proche l'un de l'autre dans les atomes à 4 électrons de valence tel que le silicium. Les isolants correspondent à une valeur d'écart  $E_g$  supérieur à 5 Electro-Volts tandis que les semi-conducteurs ont une  $E_g$  inférieure à 5 Electro-Volts. En effet, si un photon est absorbé par un matériau ayant une  $E_g$  pas très grande ou si la température a changé, un électron peut sauter la bande d'énergie  $E_g$  et peupler la bande de conduction. Cette action laisse un trou qui va se comporter comme une charge positive et qui va se combiner avec le premier électron qu'il rencontre, ce qui donne la naissance d'un champs électrique et puis d'un courant électrique.

Le moyen couramment utilisé est la création d'une jonction P-N obtenue en dopant le semi-conducteur par une faible quantité d'un autre matériau appelé impureté. Le dopage P consiste à ajouter au silicium des atomes possédants trois éléments de valence. Suite aux liaisons covalentes, un trou est créé par chaque atome étranger. Ce dopage est fait sur la face arrière du semi conducteur. Sur la face exposée à la lumière, on a un dopage N qui consiste à ajouter des atomes à cinq électrons périphériques. Quatre vont participer aux liaisons covalentes tandis que le cinquième électron va se retrouver libre et pouvoir se déplacer comme un porteur de charge mobile suite à une excitation lumineuse ou de température. En collant une plaque de cristal de silicium dopé N à une autre dopée P sous forme d'une jonction P-N, un champs électrique interne qui peut entrainer les charges électriques extérieures sera possible sous l'éclairement solaire [Jou-09] (fig1.1).

Une cellule photovoltaïque est le dispositif élémentaire d'un générateur photovoltaïque. Il existe en générale trois types de cellules qui se distinguent en fonction du silicium utilisé et qui sont classés suivant leurs efficacité énergétique (fig 1.2):

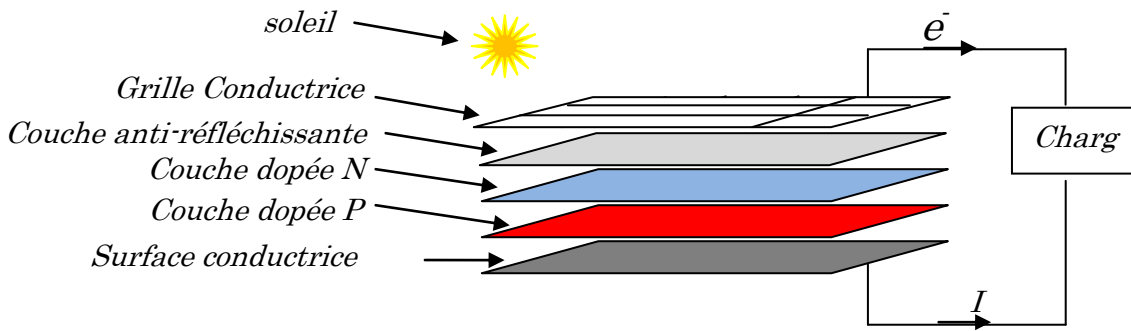


Fig.1.1. Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque

1<sup>ère</sup> Cellule de silicium monocristalline : la cellule est composée d'un seul cristal de silicium.

2<sup>ème</sup> Cellule de silicium poly-cristalline : plusieurs cristaux entre dans la composition d'une seule cellule.

3<sup>ème</sup> Cellule amorphe : la cellule est réalisée avec du silicium non cristallisé, étalé sur une plaque de verre.



(A) Cellule monocristalline


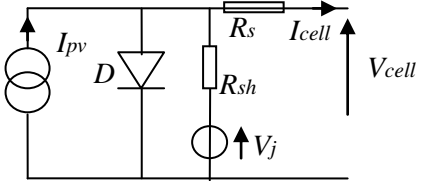

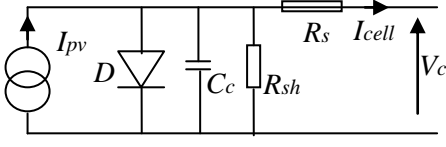

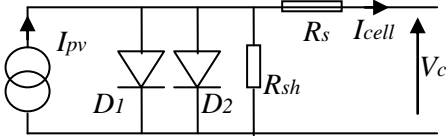
(B) cellule poly-cristalline

(C) cellule amorphe

Fig1.2 : types de cellules photovoltaïques

Plusieurs modèles des circuits équivalents sont proposés pour l'identification du comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Leurs complexités diffèrent suivant le niveau de précision demandé. Le tableau suivant présente les modèles qui figurent dans la littérature [Pic-10] (Tab1.1)

modèle	Circuit équivalent	Nombre de Paramètres	précision
Idéal	 $G(W/m^2)T_c(K^\circ)$	3	Faible
Une diode	 $G(W/m^2)T_c(K^\circ)$	5	Bonne

Bishop's	 $G(W/m^2)T_c(K^\circ)$		8	Bonne
Dynamique	 $G(W/m^2)T_c(K^\circ)$		6	Bonne
Deux diodes	 $G(W/m^2)T_c(K^\circ)$		7	meilleur

Le modèle à une diode est le plus utilisé puisqu'il présente une bonne précision avec moins de paramètres. Son modèle mathématique est sous la forme suivantes [dah-15(1), dah-15(2), dah-16(2), dah-16(3)] :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V_{cell} + I_{cell}R_s)}{\tau kT} \right) - 1 \right) - \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{R_{sh}} \\ \text{avec: } I_0 = I_{0r} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left( -\frac{qE_{GO}}{\gamma k} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right) \\ \text{et: } I_{ph} = (I_{SCR} + K_I(T - T_R)) \frac{\lambda}{1000} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

$I_{ph}$  est le courant total généré par le générateur de courant sous certaines conditions données (température et éclairage).  $I_{SCR}$  est le courant de court-circuit à la température de référence  $T_r = 298.15K$  et  $\lambda = 1KW/m^2$ .  $I_{OR}$  est le courant de saturation inverse.  $\gamma$  est le facteur d'idéalité,  $K_I$  le coefficient de température du courant de court-circuit à  $I_{SCR}$ ,  $E_{GO}$  la bande de gap du silicium.

La puissance générée par une cellule photovoltaïque dépend principalement de deux paramètres qui sont l'éclairement  $\lambda$  et la température  $T$ . D'autres facteurs peuvent influencer la génération de la puissance comme la vitesse du vent et l'humidité mais ils sont pratiquement négligeables.

### 2.1. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Quel que soit la technologie utilisée ou le modèle considéré, la caractéristique photovoltaïque présente le même comportement du courant en fonction de la tension, et par conséquent de la tension en fonction de la puissance. L'éclairement et la température des cellules photovoltaïques sont les deux paramètres majeurs qui décrivent cette caractéristique. La figure 1.3 présente les caractéristiques typiques pour différents éclairages et températures.

A partir de la figure, on note que :

\*La cellule se comporte comme un générateur de courant pour une tension inférieure à 0.5 volts ; le courant reste pratiquement constant.

\*La cellule se comporte comme un générateur de tension à partir de 0.5 volts ; la tension reste pratiquement constante.

\*la puissance fournie par la cellule passe par un maximum qui s'appelle le point de puissance maximale. Il est largement connue dans le milieu scientifique par MPP.

\* la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ne se change pas en fonction des conditions climatiques ambiantes (éclairage & température). Il est fonction du matériau utilisé dans les jonction électroniques PN. Cette tension est obtenue en branchant directement un voltmètre sur les bornes de la cellule.

\*le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est directement proportionnelle à l'éclairage et à la surface de la cellule. Pour une tension en circuit ouvert entre 0.4 volts et 0.6, une cellule en silicium peut générer un courant de C.C. de l'ordre de 20 mA/cm<sup>2</sup> dans des conditions standard (rayonnement solaire incident normal de 1Kw/m<sup>2</sup> ; une température de 298.15 kelvins). La valeur de ce courant est obtenue en branchant l'ampèremètre sur les bornes de la cellule.

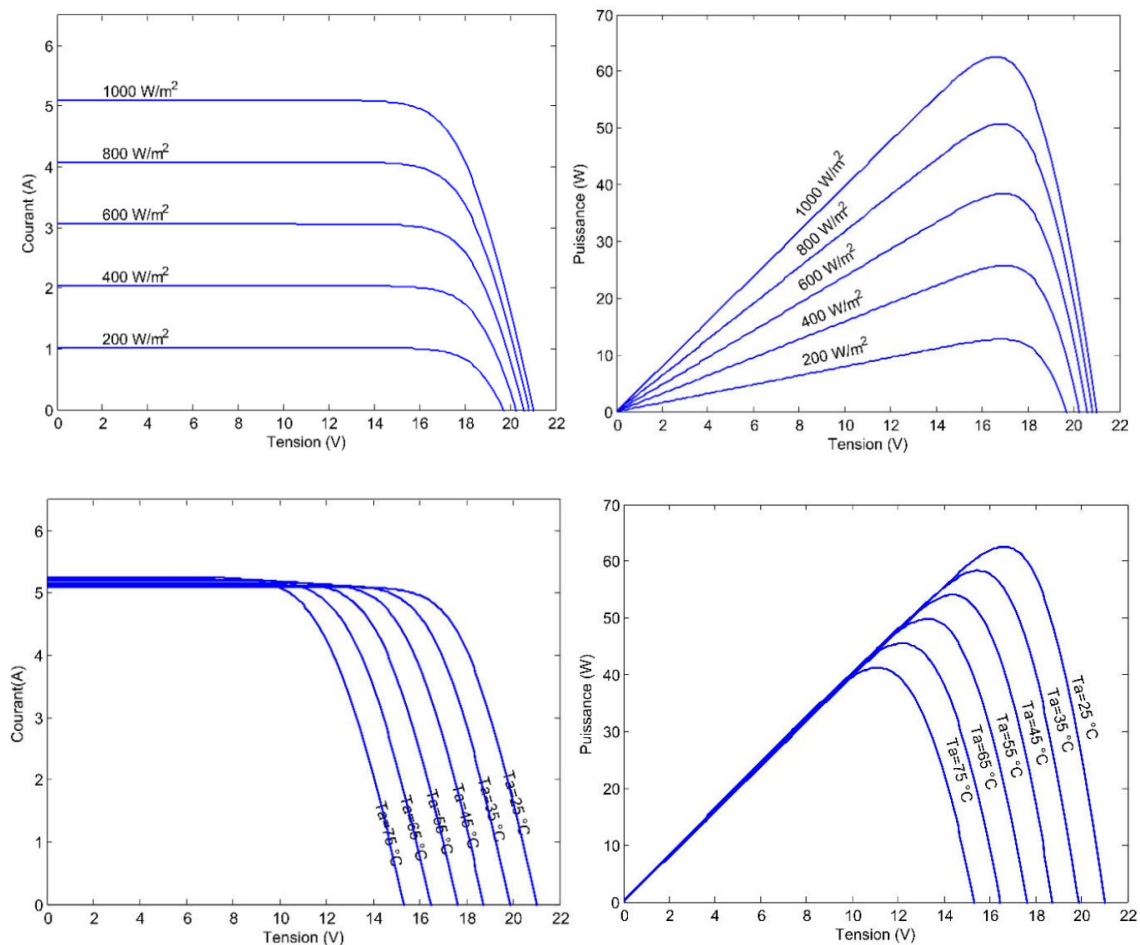


Figure 1.3 : caractéristique photovoltaïques courant-tension et puissance-tension

La caractéristique d'une seule cellule est identique à celle d'un panneau comportant plusieurs cellules. L'association de plusieurs panneaux photovoltaïques formant un générateur photovoltaïque peut changer les points de fonctionnement sans influencer la courbure typique du photovoltaïque.

## 2.2. Protection classique d'un générateur photovoltaïque

Afin d'augmenter la durée de vie d'une installation photovoltaïque et d'éviter les pannes liées à l'association de plusieurs dispositifs photovoltaïques, il est absolument important d'insérer des outils de protection. Deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

\*protection pour les connexions parallèles par diode anti-retour pour éviter le retour du courant dans le photovoltaïque.

\*protection par une diode by-pass en cas de connexion en série pour éviter la panne de la chaîne entière.

L'addition des modules identiques en série, garde le courant constant, mais augmente la tension proportionnellement au nombre de modules insérés. Dans le cas d'une impédance de charge faible ou en cas de C.C. , les cellules/modules ombrés seront soumis à une tension inverse égale à la somme des tensions délivrées par les autres cellules/modules. Une destruction par claquage devient possible due à l'échauffement de dissipation de puissance (hot spot). La solution réside à la limitation de la tension inverse en insérant une diode parallèle au niveau de chaque cellule (à la construction du panneau) et au niveau de chaque module (à l'installation de plusieurs modules). La diode devient passante et limite la tension inverse de la cellule/module par sa tension directe. Lors du fonctionnement normal, la diode demeure inopérante et n'influe pas sur le rendement du dispositif photovoltaïque.

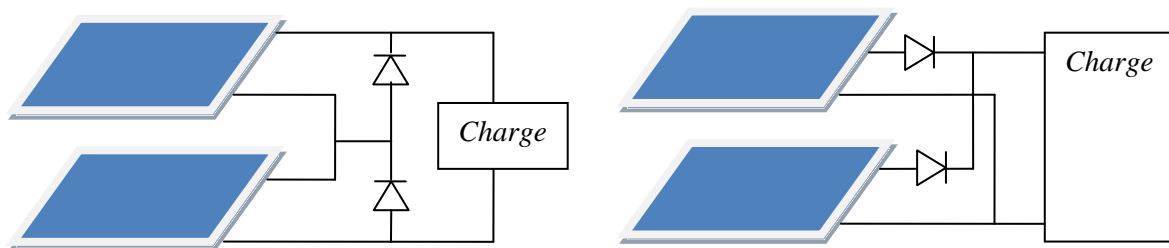


Fig1.4 : Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque

En insérant des modules identiques en parallèle, les tensions aux bornes de chaque branche restent égales alors que l'intensité augmente en fonction du nombre des modules insérés. Dans le cas d'une grande impédance de charge ou en cas de C.O. , les cellules/modules ombrés seront

soumis à une tension supérieure à la tension délivrée par les autres cellules/modules. Les modules ombrés deviennent récepteurs puisque leur tension de fonctionnement est inférieure à la tension d'utilisation. Alors une puissance importante sera dissipée dans ces modules à travers un courant inverse produit par les autres modules en fonctionnement normal. La solution est d'insérer une diode anti-retour susceptible d'empêcher le gaspillage de l'énergie produite par les branches en fonctionnement normal. Une diode à une tension de seuil faible est préférée pour limiter la perte de puissance de tension permanente due à la chute de tension (figure 1.4).

### 3. Energie éolienne

La technologie d'énergie éolienne a évolué rapidement ces trois dernières décennies avec l'augmentation des diamètres du rotor et de l'utilisation de l'électronique de puissance sophistiquée qui permet l'opération à une vitesse variable du rotor.

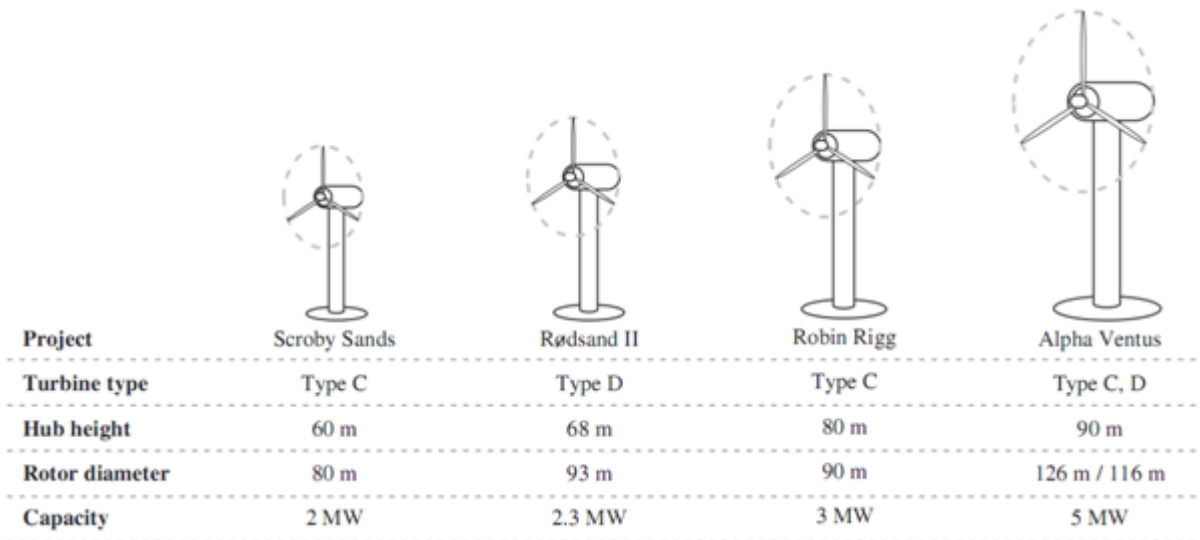


Figure 1.5 : Les différents types de turbines éoliennes

L'éolienne est un dispositif électromécanique qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et puis en énergie électrique. L'énergie cinétique du vent est captée par des pales sous forme d'une rotation autour d'un axe horizontal ou vertical. Cette rotation est transmise à une génératrice souvent de type synchrone ou asynchrone qui produit du courant triphasé.

Les premières structures développées ont été les éoliennes à axes verticales puisqu'elles possèdent l'avantage d'avoir la génératrice et les organes de commande au niveau du sol, ce qui facilite l'installation et la réparation. Pourtant elles sont moins utilisées à cause de leurs rendements modestes. Trois types de turbines à axe horizontales sont mises en considération de nos jours à savoir : Savonius, Darrieus classic et Darrieus en forme H.

Les turbines à axe horizontale à trois pales (tripales) sont les plus répandues. Il en existe aussi d'autres turbines à deux ou à plusieurs pales. Le rotor tripales étant le plus utilisé vu le facteur

de puissance qui permet l'obtention d'un rendement élevé et le cout de production et d'installation qui diminue constamment. La charge aérodynamique sur les turbines tri pales est uniforme, ce qui donne la stabilité à la turbine et qui permet d'atteindre des longueurs de pales énormes dépassant 70 m de rayon.

Une turbine à axe horizontale est fixée au sommet de la tour ce qui permet la capture d'une quantité importante de l'énergie éolienne. Ce type d'éoliennes peut être classé en deux sous-types ; suivant la vitesse de rotation si elle est variable ou bien fixe :

\*l'éolienne à vitesse fixe est la première a été développée. Dans cette technologie, le rotor doit tourner à une vitesse angulaire fixe indépendamment du vent ou bien il doit s'arrêter. Pour ce fait, Il est muni d'un système d'orientation et d'inclinaison des pales pour garder toujours la vitesse fixe. La génératrice qui est souvent de type synchrone ou asynchrone et qui est directement liée au réseau triphasé doit fonctionner au voisinage du synchronisme. Bien que cette technologie est relativement moins chère due au nombre réduit des dispositifs électroniques de puissances, elle est délaissée à cause de son faible rendement.

\*l'éolienne à vitesse variable est la plus répandue ; plus performante que les éoliennes à vitesse fixe surtout à des vitesses du vent moins élevées. Sa possibilité d'extraire la puissance maximal disponible est meilleur. Dans ce type d'éolienne, une séparation entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation est nécessaire. La turbine doit s'adapter à la vitesse du vent afin d'optimiser la puissance fournie au réseau, tandis que la fréquence et le voltage du réseau doivent rester fixe [Tav-12].

### **3.1. Description d'une éolienne**

Les éolienne les plus souvent utilisées sont celles à axe horizontale. Elle sont typiquement constituées par trois grandes parties : le rotor, la tour et la nacelle.

La tour : elle s'appelle aussi le mât. Elle permet l'emplacement du rotor à une hauteur suffisante pour éviter le touché du sol. d'autre part, elle assure une puissance transmise non perturbée par la non uniformité du sol. que se soit le béton armé ou bien l'acier, la tour doit être auto résistante aux différentes vibrations et aux turbulences du vent.

Le rotor : est le dispositif mécanique qui transforme l'énergie de vent en rotation. Il est constitué par un moyeu qui assure la liaison entre les pales et l'arbre de la turbine.

La nacelle : est la boîte au sommet de la tour, elle contienne les différentes composantes électriques, électroniques et électromécaniques qui permettent le bon fonctionnement de la conversion de l'énergie éolienne. Parmi ces composantes on trouve ; le multiplicateur de vitesse qui permet la multiplication de la faible vitesse de rotation de la turbine à une vitesse plus élevée au niveau du rotor de la génératrice. Cette dernière est souvent une machine synchrone ou

asynchrone. Un contrôleur électronique qui n'est qu'un ordinateur qui gère d'une manière optimale l'ensemble de l'éolienne est inclus aussi dans la nacelle. Son rôle est de commander la génératrice, d'orienter la turbine face au vent et de mieux capter les pannes de fonctionnement. Des dispositifs électromécaniques d'orientation de la nacelle et des pales de la turbine sont aussi inclus dans la boîte de la nacelle.

### 3.2. Les bases de conversion de l'énergie éolienne

#### 3.2.1. L'énergie éolienne

Lorsqu'une éolienne est située dans une masse d'air qui se déplace, une partie de l'énergie cinétique de cette masse est transformée en énergie mécanique disponible sur l'arbre du rotor de l'éolienne.

Soit  $dE$  l'énergie d'une colonne d'air de longueur  $dl$ , d'une section  $S$ , d'une masse volumique  $\rho$  et qui se déplace à une vitesse  $V_v$  (figure 1.5). Cette énergie peut être exprimée à la forme suivante [Bur-01], [Man-02]:

$$dE = 0.5 \rho S dl V_v^2 \quad (1.2)$$

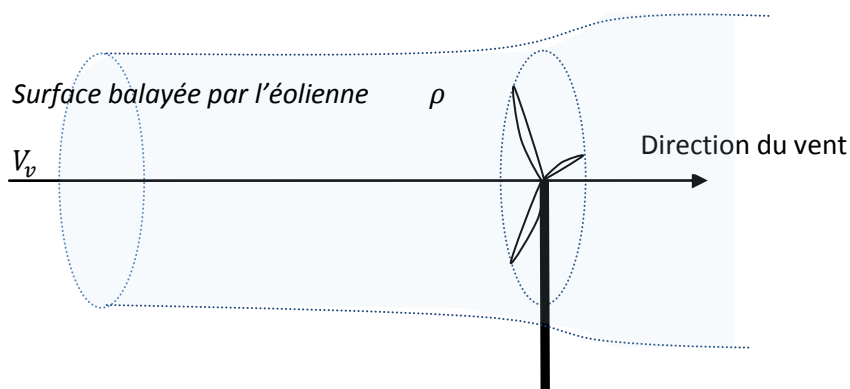


Figure 1.6 : une éolienne dans une colonne d'air

La puissance aérodynamique d'une masse d'air qui traverse l'éolienne est la dérivée de l'énergie :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v_v^3 \quad (1.3)$$

La puissance aérodynamique extraite par la turbine sur son arbre est strictement inférieure à la puissance aérodynamique de la masse d'air. Un coefficient aérodynamique qui est nommé coefficient de puissance, détermine le taux de puissance récupéré est nécessaire.

#### 3.2.2. La vitesse réduite

La vitesse réduite est un facteur aérodynamique spécifique à chaque turbine suivant leur dimensionnement. Il est défini comme étant le rapport de la vitesse tangentielle au bout des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{V_v} \quad (1.4)$$

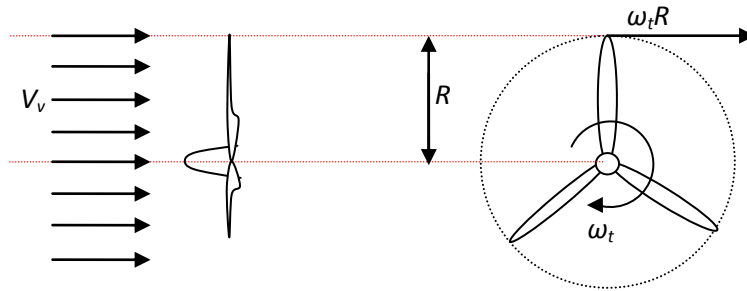


Figure 1.7 : vitesse réduit de l'éolienne

### 3.2.3. Le coefficient de puissance

Ce facteur est sans dimension. Il exprime la capacité de la turbine à extraire l'énergie du vent :

$$C_p = \frac{P_t}{P_a} = \frac{1}{0.5\rho S V_v^3} \quad (1.5)$$

Le facteur de puissance dépend à la fois de l'angle de calage des pales de la turbine  $\beta$  et de la vitesse réduite  $\lambda$ . A chaque forme aérodynamique ( longueur des pales, profile des sections des pales) est attribué un facteur de puissance. La conception de cette forme aérodynamique est sujette de plusieurs critères comme la gamme des vitesses de vent, la puissance nominale, le couple résistant maximal etc.

Soit une turbine quelconque placée dans un écoulement libre d'un fluide. La limite de Betz est la valeur théorique supérieure d'énergie que peut capter cette turbine. Cette limite est donnée pour un facteur:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (1.6)$$

La forme la plus connue du coefficient de puissance de la turbine tripales est donnée par (figure 1.8) :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left( -\frac{21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (1.7)$$

Avec  $\lambda_i = \frac{1}{\frac{\lambda + 0.08\beta}{\lambda + 0.08\beta} \frac{0.035}{\beta^3 + 1}}$

### 3.2.4. Couple aérodynamique

La puissance captée par la turbine est :

$$P_t = C_p 0.5\rho S V_v^3 \quad (1.8)$$

Le couple qui fait tourner l'arbre du rotor à la vitesse angulaire  $\omega_m$  est :

$$T_t = P_t / \omega_t = C_p 0.5 \rho \pi R^3 V_v^2 / \lambda \quad (1.9)$$

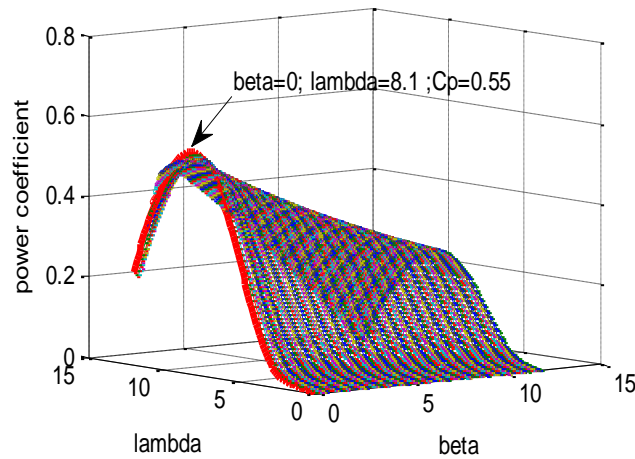


Figure 1.8 : le coefficient de puissance en fonction de  $\beta$  et de  $\lambda$ .

#### 4. Énergie de la marée

Avec l'augmentation de la demande de l'énergie et les problèmes liés aux énergies renouvelables classiques à savoir le changement aléatoire des sources de soleil et du vent, les recherches sont menées à trouver d'autres sources d'énergie renouvelable qui sont plus prévisibles. Plusieurs chercheurs ont trouvés que l'énergie qui provienne de l'océan pourra être une solution. Plus que 70% de surface terrestre est couverte par les océans, avec des ressources énergétiques globales estimées à 4000 TWh (0.002% du demande énergétique mondial). Cependant l'énergie d'origine marine est toujours difficile à exploiter, même s'elle existe sous différentes formes ; comme le mouvement des vagues : la marée, l'osmose entre l'eau fraîche et l'eau salée et l'énergie thermique.

**Energie des vagues ;** Cette énergie est sujette du mouvement verticale de la surface de l'océan. Ce mouvement est due au frottement du vent et de la surface de l'océan. Le taux d'énergie récupéré dépend principalement à la hauteur, la fréquence, et au largeur du vague.

**Energie de la marée;** dépend principalement de la position de la terre, la lune et du soleil qui ont une force de gravitation susceptible de tirer et de relâcher l'océan. Cette énergie peut être exploitée par différentes formes suivant l'endroit d'utilisation des turbines hydroliennes. En général, les courants marins n'ont pas une vitesse élevée dans les endroits ouverts par rapport aux endroits étroits où la vitesse atteint parfois 7m/s. Une énergie importante est extraite lors de l'augmentation et de la descente de la marée. Le profile de la marée est presque sinusoïdal d'une période de 12 heurs et d'une amplitude variable suivant les régions [Hao-14].

##### 4.1. Physique de la marée

Les champs des gravitations lunaires et solaires produisent le mouvement d'augmentation et de la décente de la marée peut être décrit de la façon suivante :

$$F = k \frac{mM}{d^2} \tag{1.10}$$

Où  $m$  représèrent la mass d'eau,  $M$  la mass de l'astronaute (lune et soleil),  $d$  la distance entre l'océan et l'astronaute et  $K$  et la constante international de gravité ( $6.67 \cdot 10^{-11} \text{m}^3\text{Kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ ). Cette formule, reflète la dépendance de force à la mass et a la distance des astronautes. Il est estimé que la force exercée par la lune est 2.17 fois plus grande que celle exercée par le soleil. Le mouvement de rotation du système terre-lune-soleil l'un autour de l'autre et la rotation de la terre autour de soi même fait varier les distances entre les océans et les astronautes de ce système.

La marée est crée par les deux corps, lune et soleil. Les actions de ces deux corps peuvent donc, selon leurs positions relatives, être ajoutées, créant des marées importantes, ou être opposées, créant des marées faibles. Lorsque le soleil, la lune et la terre sont alignées à cette ordre, les forces sont ajoutées , mais lorsqu'ils forme un angle droit où la terre est au milieux la force résultante sur l'océan est faible. La figure 1.9 montre les différentes positions du système soleil-lune-terre et les marées correspondantes.

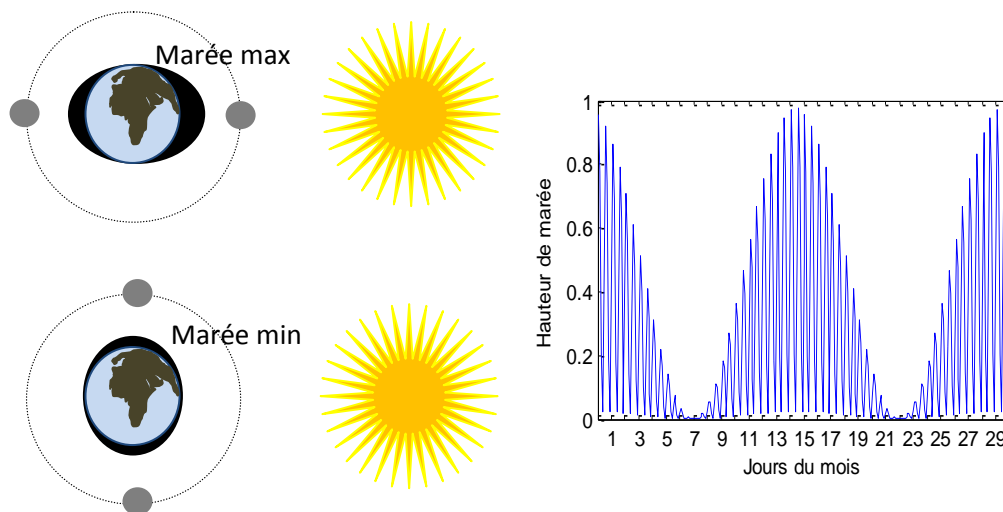


Figure 1.9 : la dynamique du positionnement du système terre -lune-soleil influe la hauteur de la marée.

## 4.2. Ressources

Certes, la première étape au lancement d'un projet d'hydrolienne est l'étude énergétique des ressources. Dès l'apparition d'une ressource rentable, les investisseurs en quête de nouvelles investissements pour en extraire d'avantage d'énergie renouvelable grâce au progrès technologiques appliqué dans le domaine. Ce qui explique l'expansion rapide de l'extraction de cette nouvelle énergie. De ce fait, la majorité des études faites dans ce domaine visent l'estimation et l'évaluation des ressources. En plus du mouvement de marée crée par le système terre-lune-soleil, il existe un autre phénomène naturels de déplacement des fluides dans l'océan. Ce type des courants marins sont forts et apparaitront dans des endroits loin et profonds où la technologie actuelle ne peut pas les exploiter (figure 1.10).

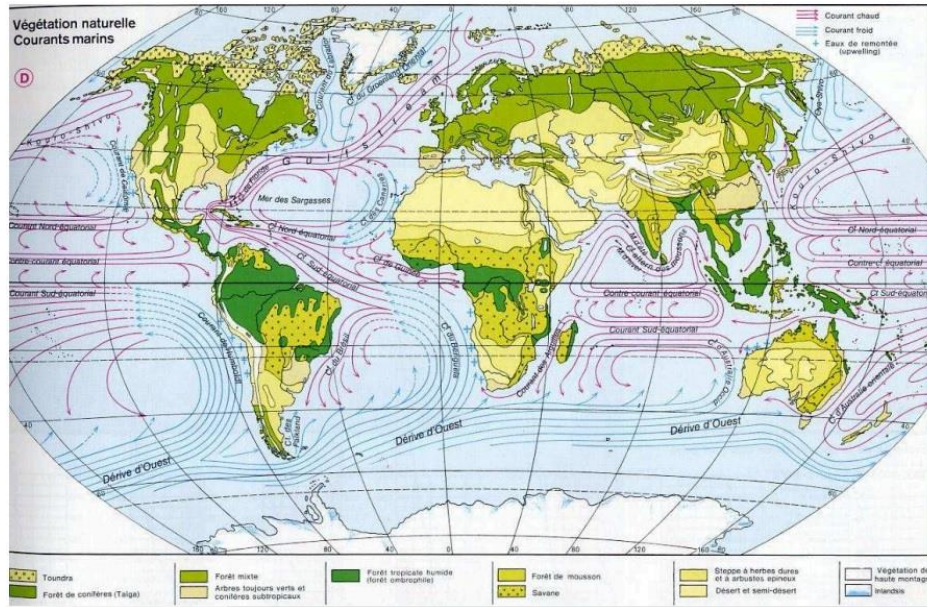


Figure 1.10 : Les différents courants marins profonds

Les courants de marées disponibles dans les régions côtières restent le meilleur choix à l'exploitation de l'énergie hydrolienne. Ils sont proches du consommateur. La profondeur est toujours accessible. Un potentiel énergétique mondial des courants de marées est estimé à 450 TW/an.

### 4.3. Projet et concept des turbines marines

Différents modèles de turbines marines ont vu le jour ces dernières décennies. Ces modèles partagent presque le même principe de fonctionnement. L'innovation se manifeste souvent dans la conception mécanique qui prend en compte le carénage extérieur et l'axe de rotation. Les turbines hydroliennes à axe horizontales sont les plus utilisées. Puisqu'elle semblent aux éoliennes, les hydroliennes bénéficient d'une grande partie de développement effectué au niveau de la commande et de la partie électrique.

#### 4.3.1. Concept de la "Marine Current Turbines" (MCT Ltd)

La société anglaise MCT a développé une hydrolienne qui dispose de deux turbines bipales identiques de 16 mètres de diamètre et qui intercepte un courant d'eau de 400m<sup>2</sup>. La tour est fixé au fond marin, et les turbines sont fixées de part et d'autre de la tour. Après le succès d'un premier prototype qui s'est installé depuis 2003, il est industrialisé à l'échelle unitaire en 2008. Dans la même année ce type d'hydrolienne à été installé en Irlande, produisant une puissance de 1.2 MW/l'unité à une vitesse d'eau de 2.4 m/s. Ce concept est actuellement commercialisé et prêt à répondre aux demandes du marché. Il est baptisé depuis 2003 en Ecosse.

#### 4.3.2. Concept "OpenHydro"

Ce concept est développé par le constructeur OpenHydro en Irlande. Il est caractérisé par le troue central et un carénage extérieur sous forme semi-conique qui canalise les flux de fluide. Dans ce

carénage il existe un générateur annuaire entourant la turbine. La technologie OpenHydro est conçue pour une rotation lente, et puis aucune lubrification n'est demandée, ce qui minimise la maintenance demandée. La turbine est fixée au fond de la mer par une base de pesanteur à trois appuis. Elle a 16 mètres en diamètre et peut générer une puissance d'environ 0.5 MW (figure 1.11).

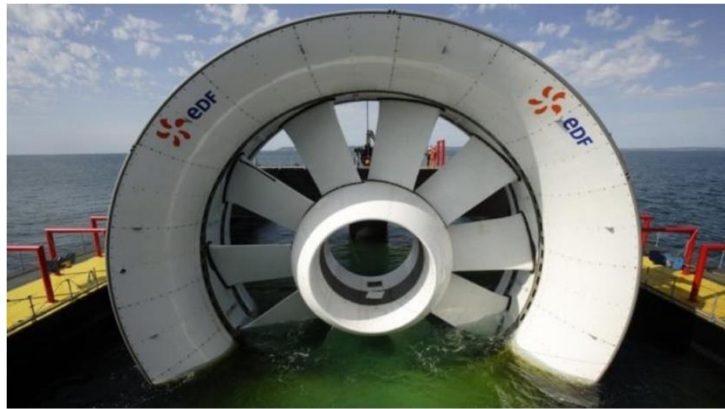


Figure 1.11 : hydrolienne Open-hydro

#### 4.3.3. Autres concepts

Plusieurs concepts dans le domaine des hydroliennes sont mis en œuvre et d'autres sont en cours de développement, ci-dessous une liste d'hydroliennes de cette dernière décennie : Hammerfest Strom, Norvège ; Tidal generation Ltd, UK ; Sabella, France ; Lunar Energy, UK ; Verdant Power, USA ; Tidal stream, UK

## 5. Utilisation de l'énergie renouvelable

### 5.1. Architecture d'une centrale de l'énergie photovoltaïque

L'architecture d'une central photovoltaïque est le type de connexion entre plusieurs panneaux PV et convertisseurs. En général, il y a deux modes de connexion ; la connexion DC et AC.

#### 5.1.1. Connexion DC

Dans les connexions DC, les panneaux PV sont contrôlés par des convertisseurs DC/DC et connectés entre eux via un bus DC. Les convertisseurs assurent la gestion de la production énergétique pour la limiter ou bien pour la maximiser. Le voltage du bus continu est fixé par l'onduleur connecté au réseau électrique, qui commande aussi le changement de la puissance réactive. En effet, tous les systèmes PV +convertisseur DC/DC injectent toutes leurs puissances produites dans le bus continu. L'onduleur est chargé de retirer la somme de ces puissances par le billet de la commande du tension de bus DC (Figure 1.12).

Cette installation a comme avantage l'utilisation d'un seul onduleur qui doit supporter toutes la puissance produite. L'onduleur utilisé doit être conçue à l'échèle des MW.

### 5.1.1. Connexion AC

Une autre façon de connecter les modules PV directement à un réseau alternatif est possible. Dans ce cas, les modules sont composés par un générateur PV, un convertisseur DC/DC et un onduleur.

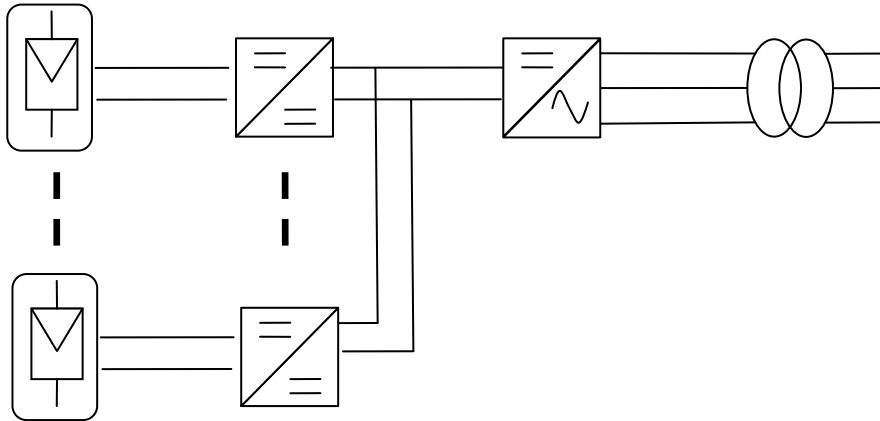


Figure 1.12 : Une centrale photovoltaïque dont les modules sont connectés à un bus DC.

Les convertisseurs DC/DC assurent l'extraction de la puissance maximale du générateur PV, tandis que les onduleurs assurent la régulation de la tension du bus continu et de la puissance. Les différents convertisseurs fonctionnent à une puissance basse où chaque convertisseur est indépendant de l'autre. En cas de panne d'un sous système, cette installation permet l'arrêt d'une seule branche au lieu du système complet (Figure 1.13).

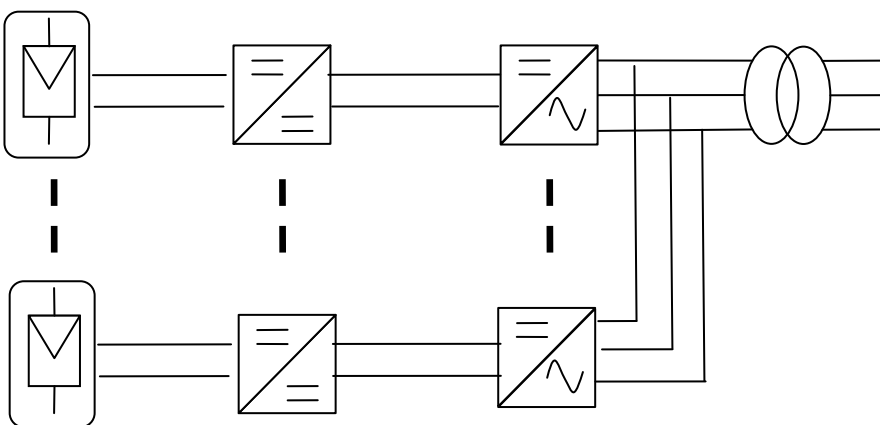


Figure 1.13 : Une centrale PV connectée en alternatif

### 5.1.2. Utilisation des batteries centralisées/décentralisées

Le stockage d'énergie peut se faire de différentes manières, soit centralisée ou décentralisée. Pour une connexion alternative entre les modules, le système de stockage est connecté directement au

réseau primaire à l'aide d'un onduleur ou bien d'un hacheur suivi d'un onduleur. Le dispositif Hacheur assure la régulation de l'état de charge, et le dispositif onduleur assure la régulation du bus continue et la puissance réactive. L'avantage de cette architecture est la flexibilité du module de stockage pour injecter ou absorber respectivement le manque ou l'excès d'énergie au niveau du point d'accouplement commun. Dans une connexion DC, le système de stockage est introduit au niveau de bus continue. Si la batterie est connectée directement au bus continue, elle va imposer la tension du bus, et l'état de charge est indirectement commandé par l'onduleur qui commande la puissance active. Ce type d'installations est souvent utilisé pour les groupes résidentiels plus qu'aux centrales PV, parce que les systèmes de stockages ne sont pas contrôlés directement.

Dans le cas des installations décentralisées, les systèmes de stockage, notamment les batteries, sont insérés entre le hacheur et l'onduleur du modules PV, où chaque module a son propre stockage. Dans cette structure, l'état de charge de la batterie est consignée par l'onduleur. Ce dernier doit être conçue pour qu'il fasse fonctionner le système (générateur PV et batterie) au point de puissance maximale.

## **5.2. Architecture de l'éolienne**

Les constructeurs des éoliennes visent à augmenter l'efficacité énergétique et à minimiser le cout du KWh. Les améliorations actuelles visent l'agrandissement de ces machines pour extraire d'avantage d'énergie, comprise entre 1.5 et 6 MW. Il existe pratiquement quatre types d'éoliennes classés suivant la vitesse de rotation de la turbine:

### **5.2.1. Turbine à vitesse constante**

Ce type d'éolienne est à base de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MSCE). La MSCE a été utilisée dans les premières éoliennes, puisqu'elle est simple à construire en grande quantité et pour différentes tailles, et demande peu de maintenance. La gamme des vitesses de vent où cette technologie peut générer une puissance est très étroite de sorte qu'elle est connue comme une éolienne à vitesse fixe. Un autre inconvénient réside au besoin des capacités de compensation de la puissance réactive, ce qui augmente le cout de la réalisation.

### **5.2.2. Turbine à vitesse légèrement variable**

Cette architecture est à base de la machine asynchrone à rotor bobiné, où le rotor est connecté à une résistance variable. Le stator est directement lié au réseau à l'aide d'un démarreur, tandis que les enroulements rotoriques sont branchés à des résistances externes variables. L'avantage de cette architecture est la possibilité d'ajuster légèrement la vitesse de rotation de la turbine en ajustant la vitesse de synchronisme de +/- 10%. Ce qui mène à une augmentation d'efficacité énergétique de plus. L'inconvénient majeur de cette technologie est l'utilisation des résistances externes, qui consomment énormément d'énergie (effet joule).

### 5.2.3. Turbine à vitesse variable à base de la MADA

La technologie éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation est en plein expansion (Figure 1.13). Dans cette architecture, les enroulements statoriques sont directement branchés au réseau électrique triphasé, tandis que les enroulements rotoriques sont branchés au réseau mais à l'aide d'un convertisseur back-to-back. Ce dernier, est composé de deux convertisseurs ; le convertisseur du côté machine (CCM), et le convertisseur du côté réseau (CCR). Ces deux convertisseurs sont commandés séparément, et branchés entre eux par un bus continu et une capacité montée en parallèle pour réduire la variation de la tension du bus. Le concept de cette technologie attire beaucoup d'intérêts grâce à ses avantages ; les convertisseurs utilisés traitent seulement 30% de l'énergie produite par la génératrice. Cela mène à une réduction considérable du coût des convertisseurs, et favorise l'économie d'énergie. L'avantage majeur de ce concept est la possibilité de convertir l'énergie éolienne maximale sur une grande gamme de vitesses du vent. L'utilisation des convertisseurs permettent via leur commande de faire fonctionner la machine de l'éolienne en mode super-synchrone et en mode sous-synchrone. En mode super-synchrone la machine se comporte comme une génératrice qui injecte de l'énergie au réseau, et en mode sous-synchrone comme un moteur entraîné par le réseau, dans ce cas l'énergie circule inversement. Ces modes de fonctionnement ont permis d'éviter l'utilisation des capacités de compensation de la puissance réactive, et aussi les outils de démarrage.

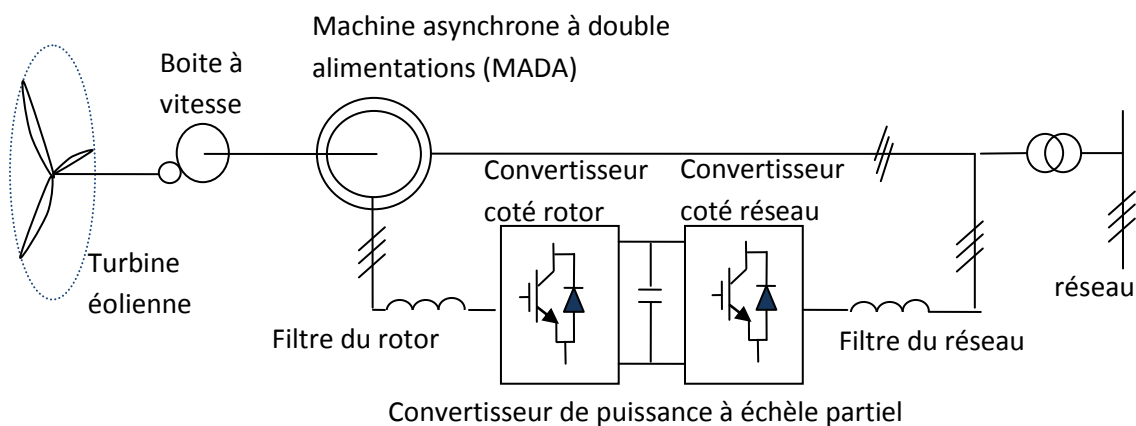


Figure 1.13 : Schéma d'une turbine éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentations.

### 5.2.4. Turbine à vitesse variable à base de MSAP

Les convertisseurs de cette technologie sont conçus pour fonctionner en plein échelle, où toute la puissance générée par la MSAP passe à travers ses convertisseurs (Figure 1.14). En plus de la MSAP, cette architecture peut supporter aussi la MACE et la MARB. Lorsqu'on se base sur cette architecture, on bénéficie de plusieurs avantages ; les balais du rotor ne sont plus utilisés, la meilleure contrôlabilité de la vitesse et de la puissance, et l'intégration parfaite dans les réseaux

électriques. Cette topologie convient parfaitement à la présente et à la prochaine génération des turbines éoliennes de l'ordre des MW avec un voltage moyen et une puissance énorme. Tout s'arrête à la conception de la commande des convertisseurs et aux matériaux utilisés à la fabrication de la turbine.

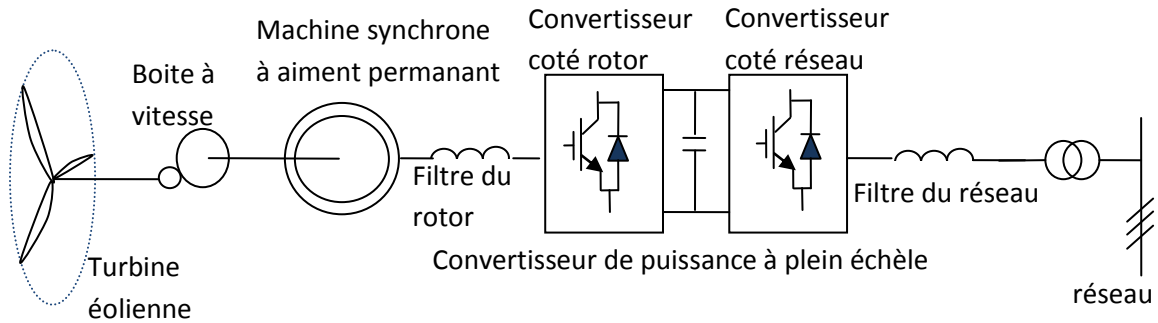


Figure 1.14 : Schéma d'une turbine éolienne à base de la machine synchrone à aimant permanent.

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art de quelques systèmes de production de l'énergie renouvelable. Ces systèmes vont être considérés dans notre travail pour l'amélioration de différentes commandes dans les chapitres qui suivent. Les énergies concernées sont l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'énergie hydrolienne. En effet, ce chapitre est consacré à la présentation des bases de conversion énergétique et des schémas électriques et mécaniques de chaque système.

## **CHAPITRE 2 :**

# **Etat de l'art des commandes des systèmes à énergies renouvelables**

### **1. Introduction**

L'utilisation des outils intelligents pour la synthèse des systèmes de commande a connu un essor important au cours de ces dernières années. On entend par outils intelligents les techniques du soft computing à savoir : la logique floue, les réseaux de neurones, les algorithmes évolutionnaires,... Les réseaux de neurones artificiels constituent des outils particulièrement efficaces pour la modélisation des systèmes non linéaires, grâce à leurs propriétés fondamentales d'approximations universelles et leurs capacités d'apprentissage. Il y a une autre technique d'intelligence artificielle qui est en pleine expansion qui s'appelle "Support Vector Machine" SVM. Cette technique présente une très grande applicabilité sur les différents systèmes de commande avec une précision inattendu. Ce qui permet de déduire des contrôleurs non linéaires intelligents peuvent être intégrés dans cette thèse comme par exemple la commande par modes glissants, via l'exploitation de la robustesse de la commande à structure variable. Ces algorithmes d'optimisation présentent des qualités intéressantes pour la résolution de problèmes d'optimisation complexes. Dans cette thèse, nous nous intéresserons principalement aux différents allures d'exploitation de la technique SVM à améliorer la commande des systèmes à énergie renouvelable.

Ce chapitre présente un aspect bibliographique de quelques commandes à structure variable à savoir : la commande par mode glissant et la commande de backstepping. Dans le même chapitre, on va traiter les bases théoriques de quelques techniques d'intelligence artificielle comme la logique flou, les réseaux de neurones artificiels et la technique des séparateurs à vaste marge SVM.

### **2. Commande des systèmes énergétiques renouvelables**

#### **2.1. Commande des systèmes photovoltaïques**

La tension et le courant générés par une source photovoltaïque dépendent principalement aux paramètres incontrôlables comme l'éclairement solaire et la température des cellules photovoltaïques. Le point de puissance maximal peut donc changer dans un champs vaste, surtout avec le changement continue des caractéristiques du générateur photovoltaïque le long de sa durée de vie qui peut dépasser 25 ans de fonctionnement. Par conséquent, un raccordement direct du générateur PV au port d'entrée d'un système de puissance qui impose une valeur de

tension constante serait un choix simple mais faible du point de vue de productivité énergétique. Le chargement direct de la batterie à partir d'un panneau photovoltaïque peut être un bon exemple ; dans cette installation, le générateur est forcé à fonctionner à la tension constante de la batterie. Si cette tension est supérieure à la tension du circuit ouvert(open-circuit voltage) du générateur alors aucune puissance ne sera générée. D'autre part, la tension du générateur PV qui correspond au point de puissance maximal ( $V_{mpp}$ ) change tout au long de la journée, ce qui rend la rentabilité énergétique très faible.

Egalement dans le cas d'une charge qui peut être un moteur à courant continu ou une résistance, l'intersection de la droite de charge et la caractéristique courant-tension (I-V) du générateur photovoltaïque est hors la zone du fonctionnement optimal du système PV+charge, où le PPM n'est pas atteint. Comme elle montre la figure 2.1 ; le point de fonctionnement résultant du raccrochement PV et batterie ou charge résistive ne correspond plus au PPM quelque soit les conditions climatiques.

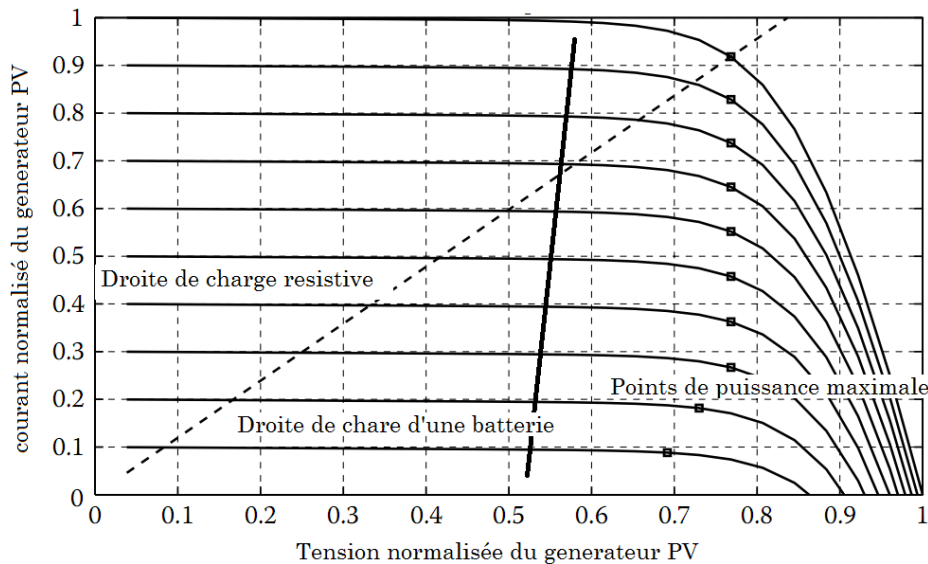


Figure 2.1 :Intersection des caractéristiques I-V du générateur PV avec les différentes droites de charge.

Par conséquent, il est obligatoire d'adopter un étage intermédiaire de conversion, connectant le générateur PV et le système qui consomme la puissance photovoltaïque produite. Cet étage doit être capable d'adapter la tension et le courant d'entrée pour atteindre le fonctionnement optimal du générateur PV, tout en maintenant la tension et le courant de sortie conformément aux exigences de la charge. Un tel étage doit être un optimisateur dynamique, qui peut effectuer cette tâche à la présence des changements dynamiques de la caractéristique I-V du générateur PV avec les conditions climatiques. Dans ce cas L'adoption d'un régulateur linéaire est inefficace énergétiquement. L'adoption d'un convertisseur de commutation demeure nécessaire dans tous les niveaux de puissance (applications de domestique photovoltaïque, les grandes centrales photovoltaïques). Néanmoins, l'intégration de cette adaptation crée un compromis entre la

maximisation de puissance et le coût du système. En effet, l'électronique de puissance utilisée doit être exploitée entièrement pour que l'efficacité énergétique du générateur / central PV dépasse un rendement de 95%.

Afin d'assurer la maximisation de la puissance extraite à partir de la source PV, l'étage adaptateur doit être auto réglable au temps d'exécution. De ce fait, sa tension et son courant d'entrée vont être changé suivant la position actuelle du PPM. Dans cette thèse il est supposé, sauf spécification différente, que l'étage adaptateur dynamique est un hacheur DC / DC et que le paramètre de contrôle est un interrupteur principal appelé rapport cycle, comme le montre la Figure 2.2.

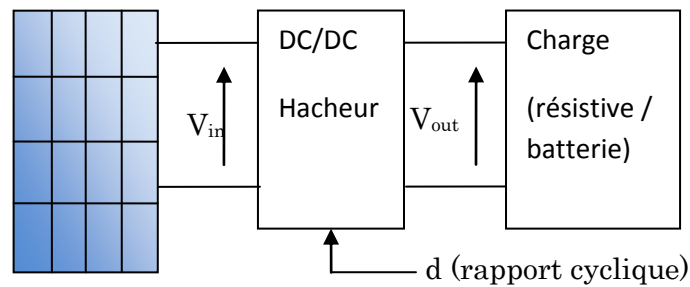


Figure 2.2 : schéma de branchement du hacheur

Supposant que  $M(d) = V_{out}/V_{in}$  est le rapport de conversion du hacheur, la résistance équivalente vu du côté PV est :

$$R_{in}(d) = R_{charge}/M^d(d) ; V_{in}(d) = V_{out}/M(d)$$

Figure 2.3. montre l'effet de l'étage d'adaptation sur le point de fonctionnement du système PV lorsqu'un hacheur est inséré entre le PV et la charge. Le rapport cyclique  $d$  doit changer constamment via un hacheur pour assurer le fonctionnement du générateur PV au point de puissance maximal quelque soit la température et l'éclairement. Cette tâche est largement connue dans le domaine scientifique en anglais par "Maximum Power Point Tracking" (MPPT) [Fem-13].

Les techniques MPPT les plus commercialisées utilisent les mesures du courant et de la tension. L'utilisation des capteurs de mesure de la température et de l'éclairement est évitée vue le cout relativement chère de ce type de capteurs (capteur de luminosité et capteur de température).

Les contrôleurs MPPT peut être réalisés par différentes méthodes et algorithmes. Les méthodes les plus populaires sont ceux basées sur la perturbation et l'observation (P&O) du processus comme la méthode de l'incrément de conductance (INC). L'implémentation de MPPT est souvent réalisée d'une manière digitale. La vitesse du convertisseur analogique-numérique ne présente aucun problème pour le MPPT puisque la vitesse de variation de la température et

l'éclaircissement est relativement lente. Cela mène les constructeurs à utiliser des microcontrôleurs ordinaires à bas prix qui servent plateforme de l'algorithme P&O ou INC. D'autres constructeurs préfèrent des dispositifs plus chers, comme la FPGA et DSP, lorsque l'approche MPPT choisie est basée sur des calculs compliqués comme ceux demandés lors de l'utilisation des réseaux de neurones et de la logique de Fuzzy.

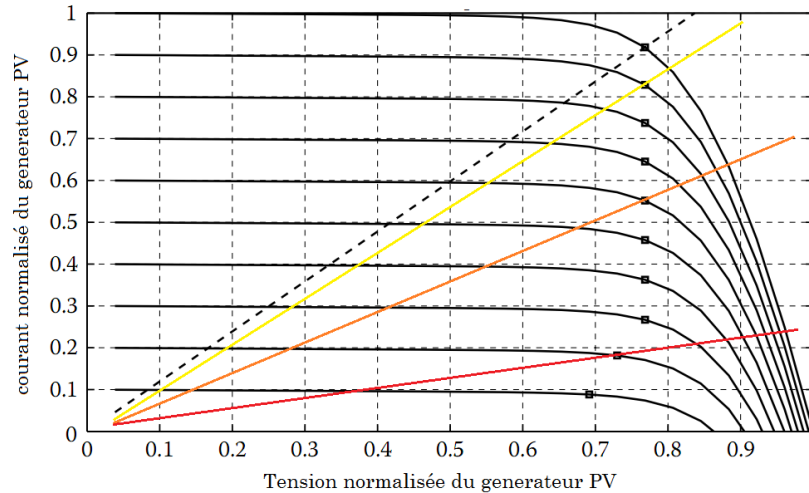


Figure 2.3 : L'effet de l'étage adaptateur qui ramène la droite de charge au point de fonctionnement optimal.

## 2.2. Commande des systèmes éoliens

La commande du système éolien se compose principalement de trois parties ; une commande est destinée au rotor de l'éolien, une commande du convertisseurs coté machine et une commande du convertisseur coté réseau. La commande du rotor de la turbine éolienne permet de fournir une consigne de référence de la puissance active optimale qu'on doit extraire à chaque circonstance. Il existe un tableau prédéfini qui fait correspondre à chaque vitesse de vent une seule puissance optimale. A partir de cette référence de puissance on tire une autre référence de couple résistant interne de la turbine éolienne pour atteindre la vitesse de rotation optimale. La commande en couple vise toujours à maximiser la puissance, tandis que la commande de l'angle de calage est faite pour la limitation de la puissance au régime du vent fort. La commande du convertisseur coté réseaux force le rotor de la machine à générer une tension alternative triphasée. Cette tension est caractérisée par une amplitude et d'une fréquence qui force le couple électromagnétique à suivre la vitesse de rotation de référence. Le convertisseur coté réseau permet de commander la puissance active transmise au réseau, comme il peut également influencer le facteur de puissance. Dans le cas d'une GADA, la puissance active est transférée entre le rotor et la tension du bus continue ; le but est de calculer la puissance active, pour maintenir la tension du bus continue constante. Les filtres du coté rotor et du coté réseau jouent respectivement le rôle de réduire les distorsions harmoniques. Ce qui permet le lissage du courant et de la tension du générateur d'une part, et de respecter les exigences et les normes du réseau d'autre part.

La commande de ces différentes composantes se fait par le biais de l'électronique de puissance qui reçoit les informations sous forme de signaux de commutation hautes fréquences. Le traitement de l'information et la prise de décision se font indépendamment suivant des algorithmes préconçus. Les principaux groupe de commande sont ; la commande linéaire, la commande à hystérésis, la commande par mode glissant et de backstepping, la commande intelligente et la commande prédictive[Min-14][Kum-16].

### **3. Méthodes classiques des commandes utilisées aux énergies renouvelables**

#### **3.1. Commande par la méthode de OCV et SCC**

Les méthodes du voltage de circuit ouvert (open circuit voltage OCV) et courant de court circuit (short circuit curent SCC) sont des méthodes indirectes de commande des photovoltaïques. Ces méthodes sont basées sur la supposition que le PPM est localisé par un voltage de fonctionnement proche de 76% du voltage du circuit ouvert VCO. Le principe pratique de ces méthodes est simple ; un interrupteur connecté en série avec le module PV est chargé de déconnecter la source PV périodiquement pour permettre la mesure de la tension du circuit ouvert, et ensuite, forcer le système PV à fonctionner à une tension égale a 76% de celle mesurée. La faiblesse de l'approche est que le pourcentage 76% ne correspond pas toujours au PPM de tout les panneaux. Dans la méthode de court-circuit le courant qui correspond au PPM (IPPM) égale à 86% du courant de court-circuit. Un interrupteur en parallèle du générateur PV permet la mesure du courant de court-circuit, et puis, la commande du courant de fonctionnement.

#### **3.2. Commande par la méthode de perturbation et d'observation**

Cette méthode appartient à la technique direct du MPPT ; elle est caractérisée par l'injection d'une petite perturbation au système, puis, on recueille les effets pour les utiliser à la conduction du point de fonctionnement au PPM. D'autres méthodes sont dérivées de l'approche P&O comme INC, auto-oscillation(self-oscillation) et la recherche d'extremum (extremum seeking). Ces méthodes différent au P&O soit par la perturbation appliquée soit par la variable observée. L'avantage majeurs de l'approche est l'indépendance de la connaissance des caractéristiques du générateur PV, le PPM est poursuit quelque soit l'irradiation, la température, le vieillissement et la dégradation, cela assure une haute robustesse et fiabilité.

#### **3.3. Commande par mode glissant**

Les lois de commande classiques de types PID sont efficaces dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Ces lois de commande peuvent être insuffisantes dans le cas des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, car elles ne sont pas robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont stricts. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. Les lois de commande dite à structure variable constituent une solution à ces problèmes, et la commande par mode glissant fait partie de ces méthodes.

### 3.3.1. Principe de la commande à structure variable par mode glissant

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. La surface de glissement étant l'ensemble des points vers lesquels on veut faire converger l'état du système.

Parmi les propriétés des modes glissants :

-La trajectoire d'état du système en mode de glissement appartient à une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état, par conséquent l'ordre des équations différentielles régissant le fonctionnement du système en mode de glissement est réduit.

-La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.

-La dynamique du système en mode de glissement est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement.

### 3.3.2. Conception de la commande à structure variable en mode glissant

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre,

- Choix de surface,
- L'établissement des conditions d'existence,
- Détermination de la loi de commande.

Il s'agit de définir d'abord la surface de glissement dite l'hyper-surface qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien et le glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure 2.4.

#### \*Choix de surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme des fonctions nécessaires. Ces deux facteurs dépendent de l'application et de l'objectif visé. On considère le système donné par l'équation (2.1), où  $x, u, f, g$  sont respectivement l'état, la commande et les fonctions de ce système.

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (2.1)$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler  $x$ , elle est donnée par l'équation suivante (2.2):

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (2.2)$$

$e(x)$  est l'écart entre la variable à régler et sa référence.  $\lambda$  est une constante positive. Il est à noter qu'en général, on donne une grande valeur à  $\lambda$  pour assurer l'attractivité ainsi que le maintien du système sur cette surface.  $r$  est un degré relatif, il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande. L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$  pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant les conditions de convergence.

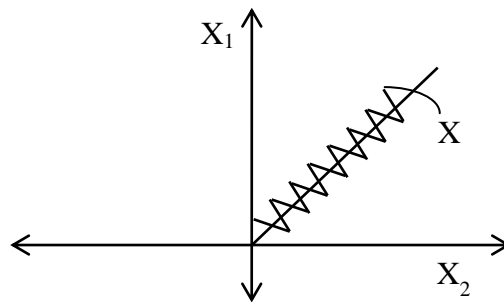


Figure 2.4 : plan de phases de la commande en mode glissant.

**\*Condition de convergence et d'existence**

Les conditions de convergence et d'existence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence.

-La fonction discrète de commutation

C'est la première condition de convergence. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{S}(x) &> 0 \quad \text{si} \quad S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) &< 0 \quad \text{si} \quad S(x) > 0 \end{aligned}$$

Cette condition peut être formulée comme suit :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (2.3)$$

-La fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'état du système. L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(x)$  pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir une commande  $u$  telle que le carré de la

surface correspond à une fonction de Lyapunov. Nous définissons la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (2.4)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (2.5)$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci n'est vérifiée que si la condition (2.3) est vérifiée.

L'équation (2.4) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimée par  $S^2(x)$  diminue tout le temps, forçant la trajectoire du système à se diriger vers la surface. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

#### **\*Calcul de la loi de commande.**

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux cotés. En présence de perturbation, la partie discontinue a pour but de vérifier les conditions d'attractivité à cette surface. La structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte  $u_{eq}$  et l'autre stabilisante  $u_n$  :

$$u = u_{eq} + u_n \quad (2.6)$$

$u_{eq}$  est la commande équivalente, elle sert à maintenir la variable contrôlée sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ .

$u_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

La commande équivalente est déduite en considérant que la dérivée de la surface demeure nulle. Supposons que le comportement en mode glissant existe sur la surface de glissement  $S(x)$  et essayons de trouver la commande continue telle que, à partir de la position initiale du vecteur d'état sur la région  $S(x(t_0))$ , la dérivée du vecteur  $S(x(t))$  demeure nulle :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} \quad (2.7)$$

En remplaçant (2.1) et (2.6) dans (2.7) nous trouvons :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x}(f(x, t) + g(x, t)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x}(g(x, t)u_n) \quad (2.8)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = -\left(\frac{\partial S}{\partial x}(g(x, t))\right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x}f(x, t)\right) \quad (2.9)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que  $\frac{\partial S}{\partial x}g(x, t) \neq 0$ .

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (2.9), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)u_n \quad (2.10)$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (2.3) devient :

$$S(x) \frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)u_n < 0 \quad (2.11)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de  $u_n$  doit être opposé à celui de  $S(x) \frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)$ . La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais de la figure (2.5) :

$$u_n = K \text{Sign}(S(x(t))) \quad (2.12)$$

Le signe de  $K$  doit être différent de celui de  $\frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)$ .

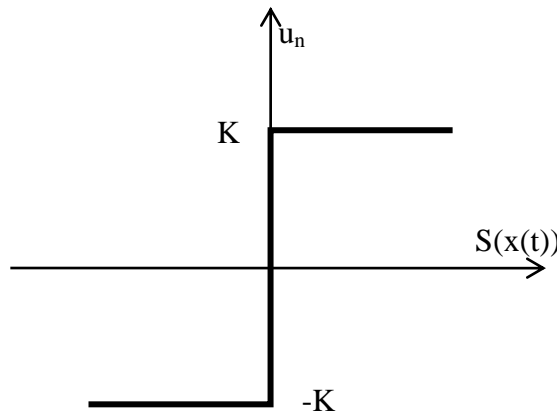


Figure (2.5) : représentation de la commande discontinue

### 3.4. Commande par backstepping

Le backstepping est une méthode récursive (étape par étape) de synthèse des lois de commande non linéaires qui utilise le principe de stabilité du Lyapunov. Une façon de stabiliser un système

non linéaire est de sélectionner une fonction Lyapunov  $V(x)$  et ensuite de trouver un contrôle de rétroaction  $u(x)$  qui rend  $\dot{V}(x)$  négatif.

On considère le système suivant :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad , \quad x \in R^n$$

$$f(0,0) = 0$$

L'idée c'est de construire un contrôleur de stabilisation en 2 étapes:

Première étape : On choisit une fonction  $V : R^n \rightarrow R$  telle que :

$$V(x) > 0, V(0) = 0$$

Deuxième étape : On choisit une commande  $u(x)$  tel que :

$$\dot{V}(x) < 0 \quad , \quad x \in R^n .$$

Considérons le système suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1^3 + x_2 f(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= g(x_1, x_2) + u \end{aligned}$$

Avec  $f(x_1, x_2)$ ,  $g(x_1, x_2)$  continues,  $u \in R$ .

$$\text{On choisit : } V(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2$$

$$\text{On aura } \dot{V}(x) = -x_1^4 + x_1 x_2 f(x_1, x_2) + x_2 u + x_2 g(x_1, x_2)$$

$$\text{Le choix de } u : u = -x_2 - g(x_1, x_2) - x_1 f(x_1, x_2)$$

$$\text{Donne } \dot{V}(x) = -x_1^4 - x_2^2 < 0$$

Remarques :

1-L'application de la commande  $u$  permet la stabilité du système en boucle ouverte. La performance du système ne sera pas garantie.

2-En cas de présence de perturbations extérieures ou d'incertitudes de modélisations, une marge suffisante de négativité de la fonction de Lyapunov doit être assurée par la variable de commande.

L'idée de base de la commande par le backstepping est de fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant stable au sens de Lyapunov, ce qui leur confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique. En d'autres termes, c'est une méthode multi-étapes, à chaque étape, une commande virtuelle est calculée pour assurer la

convergence du système vers son état d'équilibre. Cela peut être atteint à partir des fonctions de Lyapunov qui assurent pas à pas la stabilisation de chaque étape de synthèse.

Tout d'abord, une description de la procédure de conception de backstepping est donnée. Puis différents aspects de la conception, tels que les différents choix de conception et le type de système qui peut être manipulé, est considéré.

Considérons un système sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = g_1 x_2 + f_1 & (1) \\ \dot{x}_2 = g_2 x_3 + f_2 & (2) \\ \vdots & \\ \dot{x}_n = g_n U + f_n & (n) \end{cases}$$

Première étape :

Définissons la première variable  $z_1 = x_1$ , et la deuxième variable  $z_2 = x_2 - \alpha_1$ , avec  $\alpha_1$  définit comme une loi de commande virtuelle. La dérivée par rapport au temps de  $z_1$  est exprimée par :

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 = g_1 z_2 + g_1 \alpha_1 + f_1 \quad (2.13)$$

Pour trouver la loi de commande virtuelle  $\alpha_1$ , nous construisons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_1(z_1) = \frac{1}{2} z_1^T z_1 \quad (2.14)$$

Sa dérivée par rapport au temps est exprimé par:

$$\dot{V}_1 = z_1^T \dot{z}_1 = z_1^T g_1 z_2 + z_1^T (g_1 \alpha_1 + f_1) \quad (2.15)$$

Un choix judicieux de  $\alpha_1$  rendrait  $\dot{V}_1$  négative et assurerait la stabilité du sous système décrit par la première équation (1). Donc  $\alpha_1$  est choisie comme suit :

$$\alpha_1 = -g_1^{-1} (k_1 z_1 + f_1) \quad (2.16)$$

On substitue  $\alpha_1$  dans  $V_1(z_1)$  et dans  $z_1$  on trouve :

$$\dot{V}_1 = z_1^T \dot{z}_1 = -z_1^T k_1 z_1 + z_1^T g_1 z_2 \quad (2.17)$$

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 = g_1 z_2 - k_1 z_1 \quad (2.18)$$

Pour une stabilité globale, le dernier terme  $z_1^T g_1 z_2$  dans  $\dot{V}_1$  sera éliminé dans la prochaine étape.

Deuxième étape :

Dans cette étape nous utilisons une nouvelle variable  $z_3 = x_3 - \alpha_2$

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = g_2 x_3 + f_2 - \dot{\alpha}_1 \quad (2.19)$$

La fonction de Lyapunov  $V_2$  pour le second sous système est choisie comme suit :

$$V_2(z_1, z_2) = V_1(z_1) + \frac{1}{2}z_2^T z_2 \quad (2.20)$$

Sa dérivée par rapport au temps est exprimée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2^T \dot{z}_2 = \dot{V}_1 + z_2^T (g_2 x_3 + f_2 - \dot{\alpha}_1) \\ \dot{V}_2 &= -z_1^T k_1 z_1 + z_2^T (g_2 x_3 + g_1 z_1 + f_2 - \dot{\alpha}_1) \\ \dot{V}_2 &= -z_1^T k_1 z_1 + z_2^T g_2 z_3 + z_2^T (g_1 z_1 + g_2 \alpha_2 + f_2 - \dot{\alpha}_1) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Pour rendre  $\dot{V}_2$  négative, la loi de commande virtuelle  $\alpha_2$  peut être choisie comme suit :

$$\alpha_2 = -g_2^{-1} (k_2 z_2 + g_1 z_1 + f_2 - \dot{\alpha}_1) \quad (2.22)$$

On substitue  $\alpha_2$  dans  $V_2$  et dans  $\dot{V}_2$  on trouve :

$$\dot{V}_2 = -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + z_2^T g_2 z_3 \quad (2.23)$$

$$z_2 = g_2 z_3 - k_2 z_2 - g_1 z_1 \quad (2.24)$$

Pour une stabilité globale, le dernier terme  $z_2^T g_2 z_3$  dans  $\dot{V}_2$  sera éliminé dans la prochaine étape.

N<sup>ème</sup> étape :

C'est le dernier pas de conception, du moment que la commande finale  $U$  apparait dans la dérivée de  $z_n$ .

$$\dot{z}_n = x_n - \dot{\alpha}_{n-1} = g_n U + f_n - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (2.25)$$

La fonction de Lyapunov globale est exprimée par :

$$V_n(z_1, z_2, \dots, z_n) = V_{n-1}(z_1, z_2, \dots, z_{n-1}) + \frac{1}{2}z_n^T z_n \quad (2.26)$$

Sa dérivée par rapport au temps est exprimée par :

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + z_n^T \dot{z}_n \quad (2.27)$$

Ce qui conduit à :

$$\dot{V}_n = \sum_{i=1}^{n-1} (-z_i^T k_i z_i) + z_n^T (g_{n-1} z_{n-1} + g_n U + f_n - \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.28)$$

Pour rendre la dérivée de la fonction de Lyapunov globale négative, la loi de commande  $U$  est choisie comme suit :

$$U = -g_n^{-1} (k_n z_n + g_{n-1} z_{n-1} + f_n - \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.29)$$

On substitue  $U$  dans  $V_n$  et dans  $\dot{V}_n$  on trouve :

$$\dot{V}_n = \sum_{i=1}^n (-z_i^T k_i z_i) \quad (2.30)$$

$$z'_n = -k_n z_n - g_{n-1} z_{n-1} \tag{2.31}$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov est négative, alors la commande  $U$  stabilise le système étudié.

#### 4. Méthodes d'intelligence artificielle

##### 4.1. Méthode de réseaux de neurones

###### \*Unité neuronale artificielle

Les réseaux de neurones artificiels demeurent l'une des formes les plus répandues et les plus efficaces des mécanismes d'apprentissage. Leur fonctionnement est inspiré de celui de la cellule cérébrale qui consiste à collecter, traiter et transmettre des signaux électriques. Ils sont composés de nœuds ou unités connectés par des liens orientés qui ont des poids ou facteurs.

Un lien de l'unité  $j$  à l'unité  $i$  sert à propager l'activation  $a_j$  de  $j$  à  $i$ . Chaque lien possède également un poids numérique  $W_{j,i}$  qui détermine la force de la connexion. Chaque unité  $i$  calcule d'abord une somme pondérée de ses entrées :

$$in_i = \sum_{j=0}^n w_{ij} a_j \tag{2.32}$$

Ensuite une fonction d'activation  $g$  est calculé pour avoir la sortie :

$$s_i = g\left(\left(\sum_{j=1}^n W_{j,i} a_j\right) - seuil\right) \tag{2.33}$$

Un coefficient de biais (seuil) sera considéré comme une entrée fixe 'a0=-1' avec un poids  $W_{0,i}$ . Le modèle standard final d'une cellule neuronale artificielle est illustré à la figure 2.4.

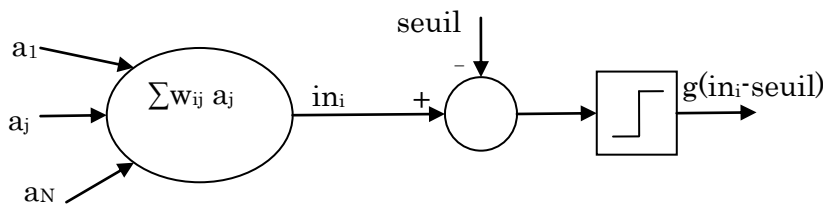


Figure 2.4 : cellule neuronale artificielle

La fonction d'activation  $g$  doit répondre à deux contraintes. On veut une activation proche de +1 quand les bonnes entrées sont données et proche de 0 quand elles sont mauvaises. Cette fonction d'activation doit être non linéaire sinon le réseau se réduit à un simple exemple linéaire. En général, il existe deux types de fonctions ; la fonction à seuil et la fonction à sigmoïde qui présente l'avantage d'être dérivable.

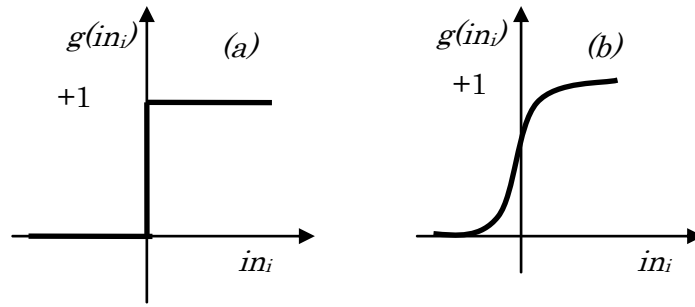


Figure 2.5 : (a) fonction d'activation à seuil, (b) fonction d'activation à sigmoïde  $1/(1+e^{-x})$

**\*structure d'un réseau de neurones**

Deux structures de réseaux de neurones existent : les réseaux acycliques, ou réseaux feed-forward, et les réseaux cycliques, ou réseaux récurrents. Un réseau feed-forward réalise une fonction de son entrée courante ; en conséquence, il n'a pas d'autre état interne que les poids eux-mêmes. En revanche, un réseau récurrent réalimente ses propres entrées avec ses sorties.

Considérons le réseau simple de la figure suivante, qui possède deux unités d'entrées, deux unités cachées et une unité de sortie.

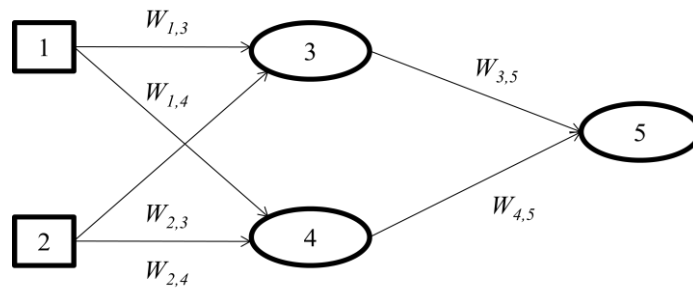


Figure 2.6 : réseau de neurone simple

Etant donné un vecteur d'entrées  $x = (x_1, x_2)$ , les activations des unités d'entrée sont positionnées à  $(a_1, a_2) = (x_1, x_2)$  et le réseau calcule :

$$a_5 = g(w_{3,5}a_3 + w_{4,5}a_4) = g\left(w_{3,5}g(w_{1,3}a_1 + w_{2,3}a_2) + w_{4,5}g(w_{1,4}a_1 + w_{2,4}a_2)\right) \quad (2.34)$$

Autrement dit, en exprimant la sortie de chaque unité cachée comme une fonction de ses entrées, on a montré que la sortie du réseau dans son ensemble,  $a_5$ , est une fonction des entrées de ce réseau. En ajustant les poids, on modifie la fonction que le réseau représente. C'est de cette façon que l'apprentissage a lieu dans les réseaux de neurones.

**\*Réseau de neurones feedforward perceptrons à seuil**

Une formulation d'un réseau de neurones feedforward est réalisée suivant les étapes suivantes :

- 1/ Initialisation des poids et du seuil  $S$  à des valeurs (petites) choisies au hasard.

2/ Présentation d'une entrée  $x = (x_1, \dots, x_n)$  de la base d'apprentissage.

3/ Calcul de la sortie obtenue  $y$  pour cette entrée :  $a = \sum(w_i - e_1) - S$

$y = \text{signe}(a)$  ; si  $a > 0$  alors  $y = +1$  sinon  $y = -1$

4/ Si la sortie  $y$  du Perceptron est différente de la sortie désirée  $y_d$  pour cet exemple d'entrée alors on modifie les poids ( $\mu$  le pas de modification choisi entre 0 et 1).

$$w_i(t + 1) = w_i(t) + \mu(\text{Err} \cdot x_i) \quad (2.35)$$

avec :  $\text{Err} = y_d - y$

Cette opération se répète jusqu'à la validation d'une condition donnée, et on obtient les derniers poids obtenue.

### \*Réseau de neurones feedforward perceptrons à sigmoïde

La philosophie des réseau de neurones consiste à ajuster les poids en minimisant l'erreur sur l'ensemble d'apprentissage. Les réseaux de neurones avec perceptrons à sigmoïde présente l'avantage de formulation d'une recherche d'optimisation dans l'espace des poids en minimisant l'erreur quadratique au lieu de l'erreur simple. Pour un seul exemple d'apprentissage avec un vecteur d'entrée  $x$  et une sortie vraie  $y$ , on écrit l'erreur quadratique :

$$E = \frac{1}{2} E_{rr}^2 = \frac{1}{2} (y_d - h_w(x))^2 \quad (2.36)$$

$h_w(x)$  est la sortie du perceptron sur l'exemple et  $y_d$  est la valeur de la sortie désirée. On peut utiliser la descente de gradient pour réduire l'erreur quadratique en calculant la dérivée partielle de  $E$  par rapport à chaque poids. On a :

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = E_{rr} \times \frac{\partial E_{rr}}{\partial w_j} = -E_{rr} \times g'(in) \times x_j \quad (2.37)$$

Avec  $g'(in)$  est la dérivée de la fonction d'activation. Son expression est donnée par :

$$g(x) = \frac{1}{(1+e^{-x})} \quad \text{et} \quad g'(x) = g(x)(1 - g(x)) \quad (2.38)$$

Dans l'algorithme de descente de gradient, lorsqu'on veut réduire  $E$ , on actualise les poids comme suit :

$$w_j = w_j - \alpha \frac{\partial E}{\partial w_j} \quad (2.39)$$

$$w_j = w_j + \alpha \times E_{rr} \times g'(in) \times x_j \quad (2.40)$$

Où  $\alpha$  est le taux d'apprentissage. Intuitivement, c'est parfaitement logique. Si l'erreur  $E_{rr} = y_d - h_w(x)$  est positive, alors la sortie du réseau est trop petite et les poids sont augmentés pour les entrées positives et diminués pour les entrées négatives. Le contraire se produit

quand l'erreur est négative, l'algorithme suivant est complet. Il passe les exemples d'apprentissage dans le réseau un par un, en ajustant légèrement les poids après chaque exemple pour réduire l'erreur. Chaque cycle sur les exemples se nomme une époque. Les époques sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt quelconque soit atteint - généralement quand les changements de poids sont devenus très petits.

#### 4.2. Méthode de la logique de Fuzzy

La conception et la mise en œuvre des systèmes avancés de l'information, de la décision et de la supervision se caractérisent par la subjectivité, l'imprécision et l'incertitudes. Exploiter la façon de raisonnement de l'homme dans l'environnement informatique nécessite la formalisation de ce raisonnement. Une approche implicite de la représentation des connaissances est la logique floue qui est largement connue sous le nom "la logique de Fuzzy (Fuzzy logic)" et qui peut être considérée comme une méthode symbolique de l'intelligence artificielle.

Au contraire des méthodes classiques qui manipulent les deux valeurs de vérité (vrais/faux), la logique floue représente des résultats incertains en se basant sur des raisonnements approximatifs plutôt qu'exactes comme celui utilisé dans la plupart des cas par les humains.

##### \*La synthèse d'un contrôleur flou

La synthèse d'un correcteur flou peut être résumée en cinq étapes comme il est expliqué à la figure 2.7

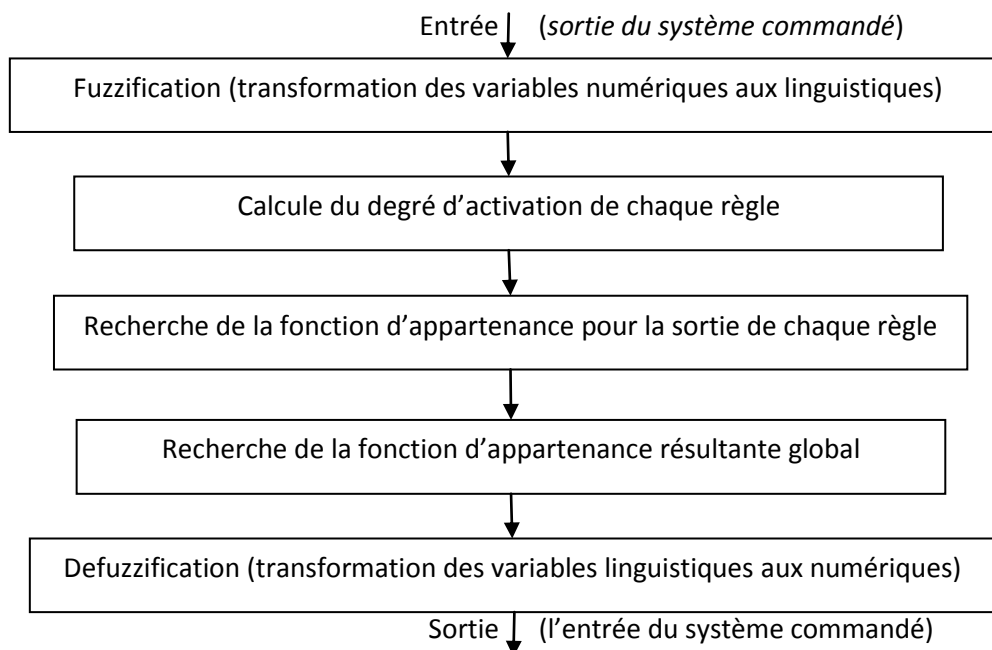


Figure 2.7. étapes du correcteur flou

\* Fuzzification

C'est le processus qui consiste à transformer une grandeur numérique en une variable linguistique. Pour fuzzifier une variable numérique il est nécessaire de donner :

a\_ L'univers du discours (Plage de variations possibles de l'entrée considérée).

b\_ Une partition en classe floue de cet univers.

c\_ Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

Par exemple une entrée note peut être fuzzifier par des partitions floues (médiocre, 2mauvais, moyen, bon et excellent) comme la montre la figure 2.8.

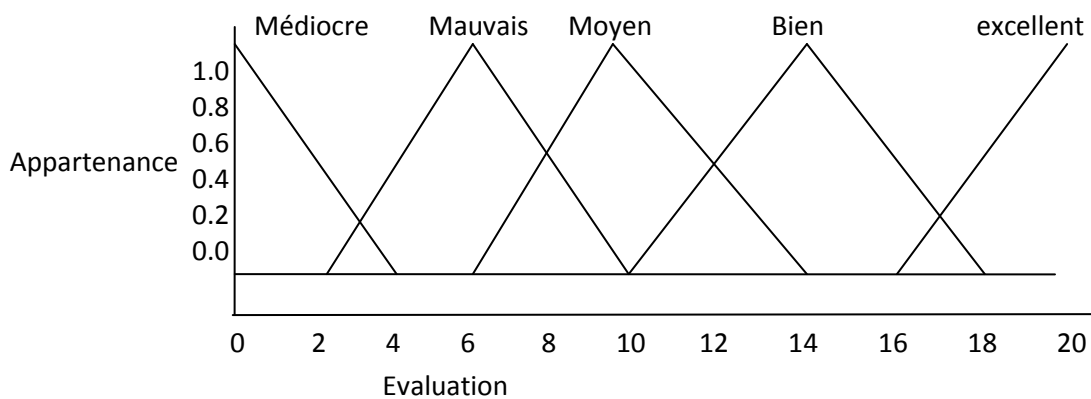


Figure 2.8 : la présentation floue d'une variable numérique

### \*Calcul du degré d'activation et la sortie de chaque règle

L'activation des règles consiste à appliquer une norme triangulaire (ou T-norme) pour obtenir le degré d'activation de chacune. c'est une valeur comprise entre 0 et 1

Selon Zadeh: c'est  $T(u,v) = \min(u,v)$  permet de représenter la conjonction ET

Règle1: Si  $X_1$  est  $A_1$  ET  $X_2$  est  $A_2$

Degré de conjonction des deux permises (Si  $X_1$  est  $A_1$  ET  $X_2$  est  $A_2$ ) est le min des degrés d'appartenances des deux permises.

Recherche de la fonction d'appartenance résultante global (Methode de mamdani)

Le mot d'implication "alors" est traduit à la logique floue par l'opérateur minimum de la valeur de la fonction d'appartenance considérée à la sortie. Ainsi la règle : Si  $x$  est  $A_1$  et  $y$  est  $B_1$  alors  $z$  est  $C_1$  est traduite par la surface hachurée de la figure 2.9:

Règle1 : Si  $x$  est  $A_1$  et  $y$  est  $B_1$  alors  $z$  est  $C_1$

L'agrégation des règles mène la sortie floue du contrôleur qui peut est illustrée a la figure 2.9

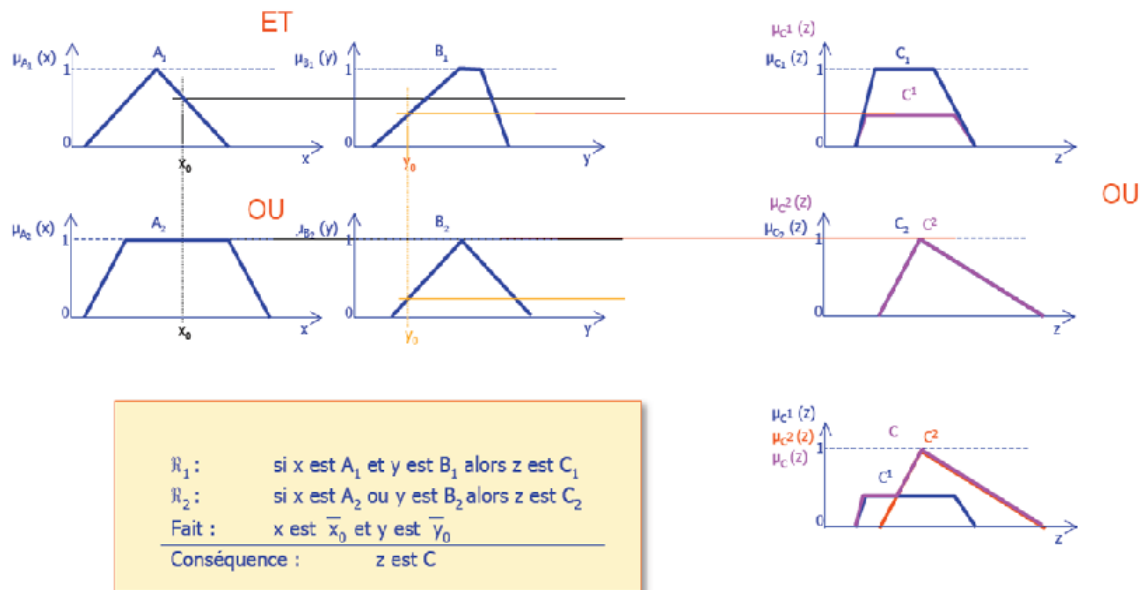


Figure 2.9 : la fonction d'appartenance partielle et la sortie du contrôleur floue

### Defuzzification

L'inférence (agrégation) fournit une fonction d'appartenance résultante pour la variable de sortie x. Il s'agit donc d'une information floue. Les actionneurs actuels, utilisés dans les boucles de commande ne s'accompagnent pas de ce genre de décision, il convient de la transformer en une grandeur de commande précise : c'est le but de l'étape de défuzzification. La méthode la plus couramment utilisée est la méthode du centre de gravité, Il s'agit de calculer la position du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante, l'abscisse de ce centre de gravité devient la sortie du contrôleur (Figure2.10).

$$sortie = \frac{\int y \cdot \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} \tag{2.41}$$

L'intégrale sur l'univers de discours (toutes les valeurs de sorties considérées).

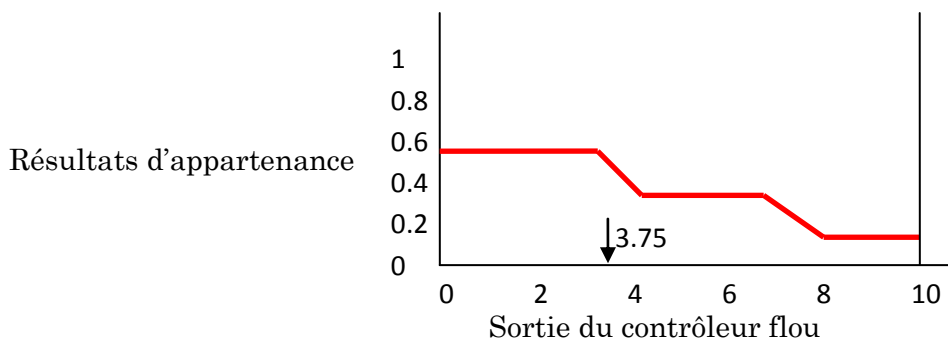


Figure 2.10 : sortie du contrôleur floue

### 4.3. Méthode de séparateur à vaste marge (SVM)

Les "Support Vector Machines" sont souvent traduits par l'appellation en français "séparation à vaste marge" sont des algorithmes d'apprentissage définis initialement pour la prévision d'une discrimination binaire (variable qualitative). Ensuite, ces algorithmes ont été généralisés pour la reconnaissance des patterns (variable quantitative). L'objectif des SVM est l'établissement d'un hyperplan qui sépare deux classes dans un espace hilbertien défini par un noyau reproduisant associé au produit scalaire de cet espace. L'idée principale des SVM est de contrôler le nombre de vecteurs support utilisées pour l'estimation.

#### 4.3.1. Les SVM linéaires

##### \*La discrimination linéaire.

Un problème est dit linéairement séparable lors de l'existence d'une fonction linéaire de décision  $D$ , qui s'appelle aussi séparateur linéaire:

$$D(x) = \text{signe}(f(x)) \text{ avec } f(x) = v^T x + a, v \in \mathbb{R}^p \text{ et } a \in \mathbb{R} \quad (2.42)$$

Ce séparateur doit classer correctement toutes les observations de l'ensemble d'apprentissage. Les fonctions de décisions sont associées aux frontières de décision :  $\Delta(v, a) = \{x \in \mathbb{R}^p \mid v^T x + a = 0\}$

##### \*la marge de classification

Pour un échantillon linéairement séparable donné, deux types de marges peuvent être attribués ; soit géométrique ou numérique. La marge géométrique  $m$  est la plus petite distance entre un échantillon et le séparateur de décision tandis que celle numérique  $\mu$  d'un échantillon n'est que la plus petite valeur de la fonction de décision sur cet échantillon. La définition mathématique de chaque marge est donnée par les formes suivantes :

$$m = \min_{i \in [1..n]} \text{dist}(x_i, \Delta(v, a)) = \frac{|v^T x_i + a|}{\|v\|} \quad \mu = \min_{i \in [1..n]} |v^T x_i + a| \quad (2.43)$$

On remarque que la marge géométrique est toujours fixe, alors que la marge numérique dépend de la pente de l'hyperplan de décision (c.a.d. de  $\|v\|$ ).

##### \*Maximisation de la marge

Il existe théoriquement une infinité de séparateurs dans le cas des observations linéairement séparables, et on est plus sûr lorsque la marge entre le séparateur et l'observation est maximale. La maximisation de cette marge revient à la minimisation de la probabilité de l'erreur. Le problème est formulé comme une maximisation de la marge géométrique:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{v,a} m \\ \text{avec } \min_{i \in [1..n]} \text{dist}(x_i, \Delta(v, a)) \geq m \end{array} \right. \quad (2.44)$$

Ce problème d'optimisation est mal formulé, parce que si  $(v, a)$  est une solution du problème, alors  $\forall k > 0$ ,  $(kv, ka)$  est aussi une solution. Pour cela un changement de variable de la manière suivante est nécessaire :

$$w = \frac{v}{m\|v\|} \quad \text{et} \quad b = \frac{a}{m\|v\|} \quad (2.45)$$

Le problème se reformule finalement comme suite :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{w,b} \frac{1}{\|w\|} \\ \text{avec } y_i(w^T x_i + b) \geq 1 ; i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (2.46)$$

Au lieu de maximiser l'inverse de la norme, la formulation classique des SVM est basée sur la minimisation de  $\|w\|^2$ , ce qui mène à la définition suivante :

Définitions (séparation linéaire par les SVM)

Soit  $\{(x_i, y_i); i = 1 \dots n\}$  un ensemble de vecteurs tel que  $x_i \in \mathbb{R}^p$  et  $y_i \in \{1, -1\}$ . On appelle séparateur à vaste marge linéaire (SVM), un discriminateur linéaire de la forme :

$$D(x) = \text{sign}(w^T x + b) \quad (2.47)$$

avec  $w \in \mathbb{R}^p$  et  $b \in \mathbb{R}$  sont obtenue par la résolution du problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{avec } y_i(w^T x_i + b) \geq 1 ; i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (2.48)$$

C'est une optimisation sous contraintes qui peut être considérée comme un programme quadratique :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_z \frac{1}{2} z^T A z - d^T z \\ \text{avec } Bz \leq e \end{array} \right. \quad (2.49)$$

Où  $z = (w, b)^T \in \mathbb{R}^p$ ,  $d = (0, \dots, 0)^T \in \mathbb{R}^{p+1}$ ,  $A = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , avec  $I$  est la matrice d'identité de  $\mathbb{R}^p$ ,  $B = -[\text{diag}(y)X, y]$ ,  $e = -(1, \dots, 1)^T \in \mathbb{R}^n$ ,  $y \in \mathbb{R}^n$  le vecteur des signes des observations dont la ligne  $i$  est le vecteur  $x_i^T$ . Ce problème admet une solution unique puisque la matrice  $A$  est semi-définie positive et les conditions d'optimalités sont suffisantes. Cette formulation est dite primale, et la résolution peut se fait par de plusieurs méthodes, comme la méthode stochastique de gauss-Seidel, la méthode d'ensembles actif et l'algorithme de point intérieur de newton.

Bien que ces différentes méthodes peuvent atteindre une solution, le passage à la formulation duale s'avère important pour deux raisons majeurs :

-la formulation duale est un programme quadratique d'ordre  $n$  (égale à la taille d'observations)

-l'apparition de la matrice de Gram  $XX^T$  qui sera utile lors de l'introduction de la non linéarité à travers les noyaux.

Pour établir la formulation duale, nous utiliserons le Lagrangien du problème et les conditions de Karush, Kuhn et Tucker (KKT) concernant l'optimalité. La notion importante des vecteurs supports viendra essentiellement de ces conditions.

**\*Les vecteurs supports et condition d'optimalité**

Lors du traitement d'un problème d'optimisation sous contraintes, il est nécessaire d'introduire le Lagrangien. Il est posé de la forme suivante dans un problème des SVM:

$$\mathcal{L}(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (w^T x_i + b) - 1) \tag{2.50}$$

Les  $\alpha_i \geq 0$  sont les multiplicateurs de Lagrange. Chaque multiplicateur est associé à une contrainte. Les conditions KKT du programmation quadratique associées aux SVM permettent la caractérisation de la solution du problème primal ( $w^* + b^*$ ) et les multiplicateurs de Lagrange  $\alpha^*$  par le système d'équations suivant :

Stationnarité :  $w^* - \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i x_i = 0$  , et  $\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i = 0$

Complémentarité  $\alpha_i^* (y_i (w^{*T} x_i + b^*) - 1) = 0$  avec  $i = 1, \dots, n$

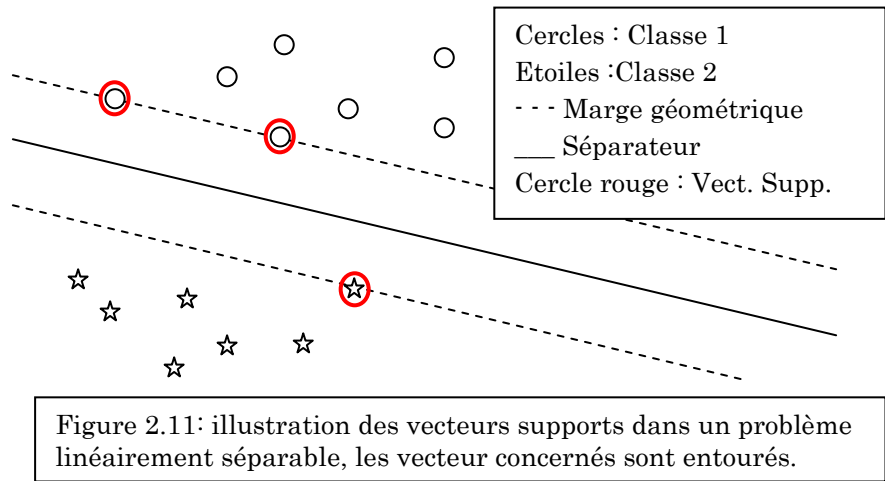
Admissibilité primale  $y_i (w^{*T} x_i + b^*) \geq 1$  avec  $i = 1, \dots, n$

Admissibilité duale  $\alpha_i^* \geq 0$  avec  $i = 1, \dots, n$

Les conditions de complémentarité définissent l'ensemble A des contraintes actives ou les  $\alpha_i$  sont strictement positifs et coïncident à l'optimum :

$$A = \{i \in [1, n] \mid y_i (w^{*T} x_i + b^*) = 1\} \tag{2.51}$$

Les  $\alpha_i$  sont nulles pour les autres contraintes qui vérifient strictement l'inégalité  $\forall j \notin A, y_j (w^{*T} x_j + b^*) > 1$  . la première condition de stationnarité sur w est intéressante  $w = \sum_{i \in A} \alpha_i y_i x_i$  . C'est un produit des observation  $x_i$  où les contraintes sont actives ( $|w^{*T} x_i + b^*| = 1$ ). Ces observations s'appelles vecteurs supports (elle supportent l'hyperplan de séparation où la marge numérique est égale à 1). Les autres observations n'est pas prise en compte puisque leurs marges numériques sont strictement supérieures à 1. La figure 2.11, illustre que les observations inutiles qui ont des contraintes non saturées sont multipliées par un multiplicateur de Lagrange nul, et les observations importantes issues des contraintes actives sont considérées des vecteurs support.



Le séparateur peut donc se représenter en deux formes ; soit avec des variables primales où bien duales :

$$D(x) = \text{sign}(f(x)) \quad \text{avec} \quad f(x) = \sum_{j=1}^d w_j x_j + b = \sum_{i \in A} \alpha_i y_i (x^T x_i) + b \quad (2.52)$$

### 4.3.2. SVM avec des données non linéairement séparables

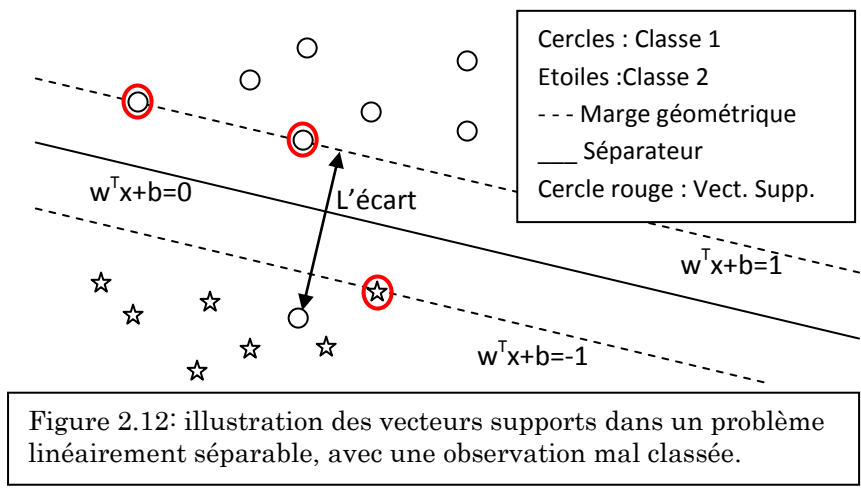
Pour les données qui ne sont pas séparables par un hyperplan linéaire, une variable d'écart est introduite pour les observations qui présentent un chevauchement (figure 2.12). Cette variable d'écart est nulle lorsque l'observation vérifie que la contrainte de marge est  $y_i(w^T x_i + b) \geq 1$ . Tandis qu'elle est positive dans le sens où elle modélise l'erreur lorsqu'il s'agit d'une observation qui vérifie  $y_i(w^T x_i + b) < 1$ . Les valeurs que peut prendre une variable d'écart sont :

observation sans erreur  $y_i(w^T x_i + b) \geq 1 \Rightarrow \xi_i = 0$

observation avec erreur  $y_i(w^T x_i + b) < 1 \Rightarrow \xi_i = 1 - y_i(w^T x_i + b) > 0$

la variable d'écart peut donc être définie par :

$$\xi_i = \max(0, 1 - y_i(w^T x_i + b)) \quad (2.53)$$



Le problème des SVM pour des données non linéairement séparables sera de la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{w,b,\xi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \xi_i^d \end{array} \right. \\ \text{avec } y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i \\ \xi_i \geq 0 \quad i = 1, n \\ \text{typiquement } d = 1 \text{ ou } 2 \end{array} \right. \quad (2.54)$$

On remarque que s'il n'y a pas d'écart et  $\xi_i = 0$ ;  $i = 1, \dots, n$ , on tombe exactement dans le cas d'une séparation linéaire par SVM. Ce problème sera formulé comme une minimisation sous contraintes avec l'ajout d'un terme  $C > 0$  qui sert à l'équilibrage :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{d} \sum_{i=1}^d \xi_i^d \\ \text{avec } y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i \\ \xi_i \geq 0 \quad i = 1, n \end{array} \right. \quad (2.55)$$

Le lagrangien dans ce cas est posé de la forme suivante :

$$\mathcal{L}(w, b, \alpha, \beta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{d} \sum_{i=1}^d \xi_i^d - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i(w^T x_i + b) - 1 + \xi_i) - \sum_{i=1}^n \beta_i \xi_i \quad (2.56)$$

Les multiplicateurs de Lagrange sont les  $\alpha_i \geq 0$  et  $\beta_i \geq 0$ . Les calculs des gradients de  $w$  et de  $b$  resteront les mêmes (les conditions de stationnarité). Une autre condition de stationnarité pour  $\xi$  sera ajoutée (avec  $d=1$ ):

$$\partial_{\xi_i} \mathcal{L}(w, b, \alpha, \xi) = C - \alpha_i - \beta_i \quad (2.57)$$

Cette condition de stationnarité permet l'élimination des multiplicateurs  $\beta$  car :

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_i \geq 0 \\ C - \alpha_i - \beta_i = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \alpha_i \leq C \quad (2.58)$$

Définition (formulation dual des SVM L1)

Les problèmes duaux des SVM avec des variables d'écarts (connue par L1 SVM) sont formulés comme suite :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\alpha \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} \alpha^T G \alpha - e^T \alpha \\ \text{avec } y^T \alpha = 0 \\ 0 \leq \alpha_i \leq C \quad i = 1, n \end{array} \right. \quad (2.58)$$

$G$  est une matrice symétrique  $n \times n$  avec :  $G_{ij} = y_i y_j x_j^T x_i$ .

Cette formulation est toujours une programmation quadratique sous contraintes de boîte. Les multiplicateurs de Lagrange  $\alpha$  qui représentent les poids des observations demeurent bornés par  $C$ , ce qui limite l'influence de l'observation.

### 4.3.3. SVM avec des problèmes non linéaires

Dans la plus part des cas, le séparateur optimal d'un problème naturel est non linéaire. La théorie des SVM utilise l'approche du noyaux qui ne change pas le fondement de la méthode pour atteindre l'objectif d'optimisation. L'intégration du noyaux est le point fort des SVM pourvue que la formulation soit duale. La fonction noyaux donne une grandeur numérique directe issue des observations. Parmi les plusieurs types qui existent, on trouve que le noyaux polynomial  $k(x, x') = (c + \langle x, x' \rangle)^p$  et Gaussien  $k(x, x') = e^{-\frac{\|x-x'\|^2}{2\sigma^2}}$  sont les plus utilisés. La décision dans le cas d'une séparation est  $D(x) = \text{sign}(f(x) + b)$ . Avec  $f(x) = \sum_{i \in A} \alpha_i y_i x_i^T x$  dans une séparation linéaire et  $f(x) = \sum_{i \in A} \alpha_i y_i k(x_i, x)$  pour les cas non linéaires.

Les coefficients de Lagrange et le biais  $b$  sont obtenus par la résolution du problème dual dans le cas des SVM linéaire (définition). Ce qui change c'est la matrice de Gram

$$G : \begin{cases} G_{ij} = y_i y_j x_i^T x_j & \text{cas linéaire} \\ G_{ij} = y_i y_j k(x_i, x_j) & \text{cas non linéaire} \end{cases}$$

#### \*Les noyaux

Dans le cas général, la frontière optimale est non linéaire. Dans le cadre des SVM, la prise en compte de non linéarités dans le modèle s'effectue par l'introduction de noyaux non linéaires. De manière inattendue, l'utilisation de noyaux ne modifie pas fondamentalement la nature des SVM.

Ce noyau est une fonction  $K$  (kernel) qui associe à tout couple d'observations  $(x, x')$  une mesure de leur « influence réciproque » calculée à travers leur corrélation ou leur distance. Les fonctions des noyaux typiques sont le noyau gaussien  $K(X_i, X_j) = \exp(-\|X_i - X_j\|^2 / \sigma^2)$  et le noyau polynômial  $K(X_i, X_j) = (\|X_i - X_j\| + ct)^d$ .

Etant donné le noyau  $K$ , la décision s'écrit  $D(x) = \text{sign}(f(x) + b)$ .

$$\text{Avec } f(x) = \begin{cases} \sum_{i \in A} \alpha_i y_i x_i^T x ; & \text{cas linéaire} \\ \sum_{i \in A} \alpha_i y_i k(x_i, x) ; & \text{cas non linéaire} \end{cases} \text{ et } b \text{ est le biais}$$

L'ensemble actif  $A$ , les coefficients  $\alpha_i$  associés et le biais  $b$  sont donnés par la résolution du même problème dual que dans le cas des SVM linéaires (définition). Le changement se fait seulement dans la matrice  $G$ , mais sa taille reste la même. Dans le cas de reconnaissance de sens où  $x$  est un nouveau échantillon la fonction  $f(x) + b$  est considérée comme une solution.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes les plus utilisées pour la commande des systèmes de production de l'énergie renouvelable ; notamment les systèmes solaires, éoliennes et hydroliennes ou des systèmes hybrides. Le principe de ces méthodes est de faire fonctionner le système énergétique d'une manière optimale quelque soit les changements climatiques subit. Que

ce soit une méthode numérique, analogique ou bien intelligente elle doit être conçue de sorte qu'elle réponde au but de la commande qui est l'optimisation du système énergétique. Le choix donc d'une méthode ou d'une autre doit être basé sur une étude qui va prendre en compte les avantages et les inconvénients. Dans les prochains chapitres, ces méthodes vont être considérées pour la conception de différentes commandes destinées aux systèmes photovoltaïques, éoliennes et hydroliennes.

## CHAPITRE 3 :

# Commande d'un système de pompage photovoltaïque

### 1. Introduction

L'acquisition d'énergie renouvelable a fait apport de solutions pour le pompage d'eau dans les pays ensoleillés, bien sur que ces pays souffrent d'un grand manque d'eau de surface. En plus des applications de cette énergie solaire presque dans tous les domaines d'appareillage (usine, station météo, éclairages, matérielles autonomes) ainsi que le domaine domestique (alimentation des maison en électricité), l'application du photovoltaïque à connue un grand succès dans le domaine de pompage [Elg-12, Moh-15]. Bien propre qu'elle soit, il demeurera parmi le énergies essentielles de l'avenir.

L'énergie photovoltaïques est hautement dépendante aux conditions climatiques ambiantes ; l'éclairement solaire et la température des modules. Qui dit donc dépendance au effets extérieurs inattendus, dit changement du point de fonctionnement optimal où la puissance est maximale (maximum power point MPP). D'où la nécessité d'un contrôleur qui garde toujours le fonctionnement optimale quelque soit les conditions climatiques[Dao-10, Elg-12]. Le rôle de ce contrôleur est de poursuivre ce point de puissance maximale (maximum power point tracking MPPT).

Beaucoup de contrôleurs sont conçu pour ce fait dans les premiers temps. les contrôleurs dit 'indirect' ont été utilisés, leurs principes sont basés sur l'estimation du point de fonctionnement optimal. Ce dernier est fonction de la mesure de la tension du circuit ouvert ou du courant de court circuit. L'imprécision de ces contrôleurs a amené les chercheurs à trouver une méthode de commande qui peut être adéquate quelque soit le matériel utilisés et les conditions climatiques. C'est le cas des méthodes basées sur les algorithmes de la perturbation et l'observation (perturbe and observe P&O). Ces méthodes sont connus par la simplicité et le niveau suffisant de performance ce qui explique leurs utilisations fréquentes aux applications commerciales. D'autres algorithmes de commande présentent théoriquement un niveau de performance élevé. Il s'agit de la commande par mode glissant et la commande de backstepping qui sont encore à la phase de recherche et de l'applicabilité. A nos jours, les applications des réseaux de neurones artificielles, et la logique floue ont fait apparition à la commande des PV.

Dans le présent chapitre nous essaierons d'étudier les avantages, les inconvénients, la déférences et l'amélioration de ces différentes méthodes. Le système de pompage reste toujours le même, ce qui change c'est la commande élaborée.

## 2. Système de pompage photovoltaïque

Le système est constitué d'un générateur PV, un convertisseur DC/DC(hacheur), un moteur à courant continue et une pompe centrifuge d'eau. Le rapport cyclique est calculé dans une unité de commande est introduit au niveau du hacheur.

### 2.1. Le modèle du générateur PV (GPV)

Le modèle à une diode est le plus utilisé puisqu'il présente une bonne précision avec moins de paramètres. Son modèle mathématique est sous la forme suivantes [Yaz-09, Dah-16(3), Dah-16(2)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{R_{sh}} \\ \text{avec: } I_0 = I_{or} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left(-\frac{qE_{GO}}{\gamma k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) \\ \text{et: } I_{ph} = (I_{SCR} + K_I(T - T_R)) \frac{\lambda}{1000} \\ A = \frac{q}{\tau N k T} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$I_{ph}$  Photo-courant.

$I_0$  Courant de saturation de la cellule PV.

$I_{SCR}$  Le courant de court circuit à l'éclairement de 1KW/m<sup>2</sup> et température de 298.15K.

$I_{or}$  Courant de saturation à la température de référence  $T_r$ .

$R_s$  Résistance série interne de la cellule PV.

$R_{sh}$  Résistance shunt interne de la cellule PV.

$K_I$  Coefficient de température à  $I_{SCR}$ .

$T_r$  Température de référence.

$T$  Température de la cellule PV.

$\lambda$  l'irradiation solaire au Watt/m<sup>2</sup>.

$q$  Charge de l'électron.

$E_{GO}$  Potentiel de la bande de silicium.

$\gamma$  Facteur d'idéalité.

$K$  Constante de Boltzmann.

Vue qu'une seule cellule ne peut pas produire une énergie suffisante pour opérer un système de pompage, alors beaucoup de cellules sont connectées en parallèle et en série au GPV pour obtenir une puissance capable de faire fonctionner un moteur à courant continu en régime nominal. Le modèle mathématique d'un GPV est le suivant :

$$I_g = I_{phg} - I_{og} \left\{ \exp\left[\frac{V_g + R_{sg}I_g}{V_t}\right] - 1 \right\} - \frac{V_g + R_{sg}I_g}{R_{shg}} \quad (3.2)$$

avec

$I_g$  Le courant du GPV

$V_g$  La tension du GPV

$R_{sg} = R_s(N_s/N_p)$  La résistance série du GPV

$R_{shg} = R_{sh}(N_s/N_p)$  La résistance shunt du GPV

$I_{phg} = N_p \cdot I_{ph}$  Le photo-courant du GPV

$I_{og} = N_p \cdot I_o$  Le courant de saturation du GPV

$N_s$  et  $N_p$  le nombre de cellule PV connectées en série et en parallèle.

La puissance du GPV est  $P_g = V_g \cdot I_g$ . elle peut être présentée comme une fonction de  $V_g$  pour différentes illuminations et températures.

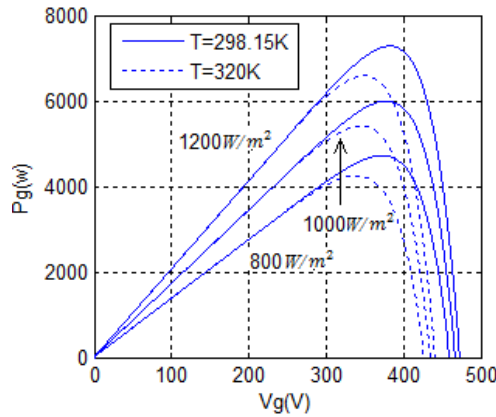


Fig.3.1 : la puissance d'un GPV power pour différents irradiances et températures

A partir de cette figure, on peut conclure qu'il existe un seul point de puissance maximale qui change en fonction de la température des cellules et de l'éclairement solaire.

## 2.2. Le hacheur (convertisseur DC/DC)

Le hacheur dans cette installation est inséré entre le GPV et le moteur à courant continu. Ce dispositif électronique est constitué par une capacité d'entrée  $C_i$  en parallèle, et une inductance en série  $L_i$  (qui forme un filtre d'entrée LC), un Switch MOSFET en parallèle, une diode et une capacité  $C_o$  branchée en parallèle comme un filtre de sortie.

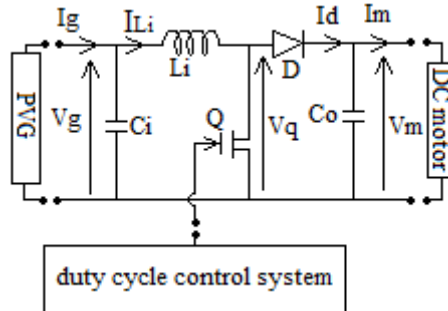


Figure 3.2 : schéma du hacheur survolteur utilisé.

Les condensateurs  $C_i$  et  $C_o$  sont choisis suffisamment grandes pour limiter les ondulations du voltage d'entrée et de sortie. En appliquant le théorème de Kirchhoff, on trouve :

$$C_i \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_{Li} \quad (3.3)$$

$$L_i \frac{dI_{Li}}{dt} = V_g - V_q \quad (3.4)$$

$$C_o \frac{dV_m}{dt} = I_d - I_m \quad (3.5)$$

La période de temps est :  $T = t_{on} + t_{off}$

Le rapport cyclique variable est :  $\alpha = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$

L'état du système commandé par le hacheur donne :

$$\frac{V_m}{V_q} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (3.6)$$

$$\frac{I_{Li}}{I_d} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (3.7)$$

Substituant ces deux équations dans le système en dessus, on a :

$$\begin{cases} C_i \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_{Li} \\ L_i \frac{dI_{Li}}{dt} = V_g - (1 - \alpha)V_m \\ C_o \frac{dV_m}{dt} = (1 - \alpha)I_{Li} - I_m \end{cases} \quad (3.8)$$

### 2.3. Moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans des systèmes qui demandent une vitesse variable. C'est le cas du système de pompage solaire, où la vitesse du moteur change le long de la journée suivant l'illumination et la température. Il est considéré dans ce chapitre que le moteur utilisé a un flux magnétique fixe. La réaction magnétique et le phénomène de commutation sont négligés. Le modèle mathématique du moteur à courant continu peut être donc exprimé comme suit :

$$V_m = RI_m + L \frac{dI_m}{dt} + E_c \quad (3.9)$$

Avec :  $E_c = k_e \cdot \Omega$

$\Omega$  la vitesse de rotation.

$k_e$  la constante de la force contre-électromotrice.

$R$  La résistance de l'armature.

$L$  l'inductance des enroulements de l'armature.

Le couple du moteur est :

$$C_m = k_m \cdot I_m \quad (3.10)$$

Avec  $k_m$  est la constante du couple.

## 2.4. La pompe centrifuge

La pompe est un élément essentiel au système de pompage. Il existe plusieurs type de pompe. Mais la plus utilisée jusqu'à à présent est la pompe centrifuge. Son couple résistant  $C_r$  est donné par l'équation suivante [Ben-15]:

$$C_r = k_r \cdot \Omega^2 \quad (3.11)$$

Avec  $k_r$  est le coefficient de proportionnalité.

L'équation mécanique du système moteur-pompe (group motopompe) est donné comme suite [Jou-08]:

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.12)$$

Avec  $J$  est la constante d'inertie du group motopompe.

La figure suivante illustre la composition du système de pompage PV

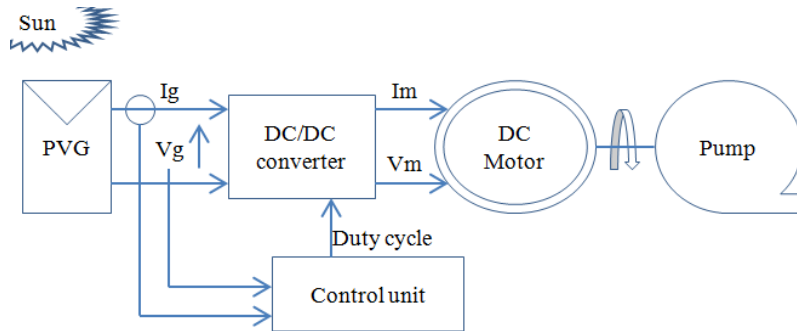


Figure 3.3 : schéma de système de pompage PV.

## 2.5. Modèle mathématique du système de pompage photovoltaïque

La combinaison de différentes équations décrivant les composantes du système de pompage PV permet d'obtenir le modèle mathématique global de ce système sous la forme suivante[dah-16(2)] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + g \cdot u \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec  $x_1 = \frac{\partial P_g}{\partial V_g}$  ,  $x_2 = \frac{\partial x_1}{\partial t} = \dot{x}_1$  ,

$$f = \left( 3 \times \left( \frac{\partial^2 I_g}{\partial V_g^2} \right) + V_g \times \left( \frac{\partial^3 I_g}{\partial V_g^3} \right) \right) \times \left( \frac{\partial V_g}{\partial t} \right)^2 + \left( \left( 2 \times \frac{\partial I_g}{\partial V_g} + V_g \times \frac{\partial^2 I_g}{\partial V_g^2} \right) \times \left( \frac{1}{C_i} \left( \left( \frac{\partial I_g}{\partial V_g} \times \frac{\partial V_g}{\partial t} \right) - \left( \frac{1}{L_o} \times V_g \right) \right) \right) \right)$$

$$g = \left( 2 \times \left( \frac{\partial I_g}{\partial V_g} \right) + V_g \times \left( \frac{\partial^2 I_g}{\partial V_g^2} \right) \right) \times \frac{1}{C_i \times L_o} V_m$$

$u = 1 - \alpha$  est la loi de commande et  $\alpha$  est le rapport cyclique.

$y = x_1$  est la sortie du système qui doit être forcé vers zéro en temps fini. L'erreur du système est choisi donc  $e = y$ .

### 3. Commande des systèmes à structure variable à base des SVM

#### 3.1. Commande par backstepping

La conception de Backstepping est un procédé de conception récursif systématique pour les systèmes non-linéaires sous la forme stricte de rétroaction, basé sur le choix des fonctions de Lyapunov. Le principe de la conception backstepping doit traiter la variable de système comme entrée indépendante pour des sous-ensembles et les résultats de chaque étape vont être des nouveaux contrôleurs virtuels pour la prochaine étape. La loi virtuelle de commande pour chaque étape est adoptée pour satisfaire les fonctions de Lyapunov choisies tels que la stabilité de chaque sous-ensemble soit garantie.

Le choix de la sortie du système de pompage est  $y = \partial P / \partial v_p$ . L'objectif de cette commande est de faire tendre la sortie mesurée  $y(t)$  vers la sortie désirée  $y_d(t)$  en un temps fini  $t_0$  ( $\lim_{t \rightarrow t_0} (y(t) - y_d(t)) = 0$ ).

##### 3.1.1. Procédure de conception du bacstepping

Le système étudié est non linéaire, il est du deuxième l'ordre. Alors, la commande peut être obtenue en deux étapes [dah-16(2)]:

Étape 1 : on va introduire l'erreur de poursuite :  $\varepsilon_1 = y - y_d$  avec  $y_d = 0$ .

Le premier sous-système considéré est :

$$\varepsilon_1 = \dot{y} \tag{3.14}$$

La stabilisation de (3.14) est obtenue par l'introduction d'une nouvelle loi de commande virtuelle :

$$\alpha_1 = \varepsilon_1 \tag{3.15}$$

Considérons la fonction définie positive de Lyapunov :

$$V_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_1^2 \tag{3.16}$$

La dérivée par rapport au temps de (3.16) donne :

$$\dot{V}_1 = \varepsilon_1 \dot{\varepsilon}_1 \tag{3.17}$$

Pour assurer la stabilité, la commande virtuelle  $\alpha_1$  doit être choisie de sorte que (3.17) soit définie négative. Le choix  $\dot{\varepsilon}_1 = -k_1 \varepsilon_1$  avec  $k_1$  est une constante strictement positive nous donne :

$$\dot{V}_1 = -k_1 \varepsilon_1^2 < 0 \quad (3.18)$$

La commande virtuelle sera donc :

$$\alpha_1 = -k_1 \varepsilon_1 \quad (3.19)$$

Étape 2 : cette fois, on va considérer que la référence est la commande virtuelle issue de l'étape 1, on définit l'erreur  $\varepsilon_2$  comme suite :

$$\varepsilon_2 = \dot{y} - \alpha_1 \quad (3.20)$$

On définit la fonction strictement positive de Lyapunov de la façon suivante :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \varepsilon_2^2 \quad (3.21)$$

La dérivée de (3.21) est :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \dot{\varepsilon}_2 \varepsilon_2 \quad (3.22)$$

A partir de (3.14), (3.18) et de (3.20) on a :

$$\dot{V}_1 = -k_1 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (3.23)$$

Substituant (3.23) dans (3.22) on aura :

$$\dot{V}_2 = -k_1 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \dot{\varepsilon}_2 \varepsilon_2 = -k_1 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2 (\varepsilon_1 + f + g \cdot u - \dot{\alpha}_1) \quad (3.24)$$

Pour que le système converge en temps finit, il faut que  $\dot{V}_2$  soit négative. On choisi donc :

$$\varepsilon_1 + f + g \cdot u - \dot{\alpha}_1 = k_2 \varepsilon_2 \quad (3.25)$$

Avec  $k_2 > 0$ . La commande finale par la méthode de Backstepping est :

$$u = \frac{-1}{g} (\varepsilon_1 + f + k_2 \varepsilon_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (3.26)$$

L'application de cette commande assure la convergence asymptotique de la sortie  $y = \partial P / \partial v_p$  vers la référence  $y_d = 0$ . De ce fait, le système fonctionne au (PPM)

### 3.1.2. Validation de la commande de Backstepping par simulation

Les performances de cette commande dans différentes conditions climatiques (température et éclairement solaire) sont vérifiées. L'éclairement solaire à changé après 8 secondes de fonctionnement de 600 Watt/m<sup>2</sup> à 1200 Watt/m<sup>2</sup>. La température à changé de 15 °C à 65 °C dans un l'intervalle de temps de 12-16 secondes (figure 3.4). Les paramètres du contrôleur sont :  $k_1 = 5$ ;  $k_2 = 20$ ;

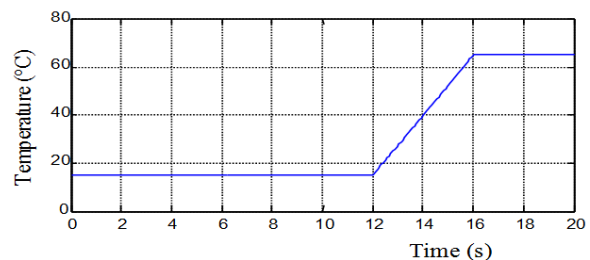
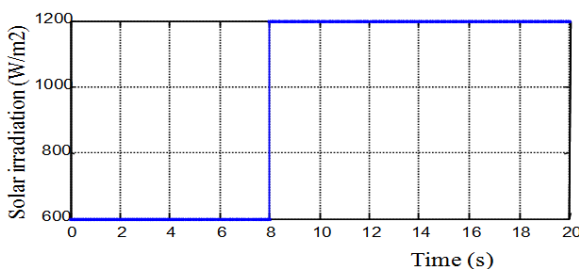


Figure 3.4 : changements d'éclairement et de la température

Les figure 3.5, montre que pour chaque éclairement et température la commande force le système à opérer au PPM. Le changements brusques et sous forme d'une rampe n'affecte pas la stabilité du système.

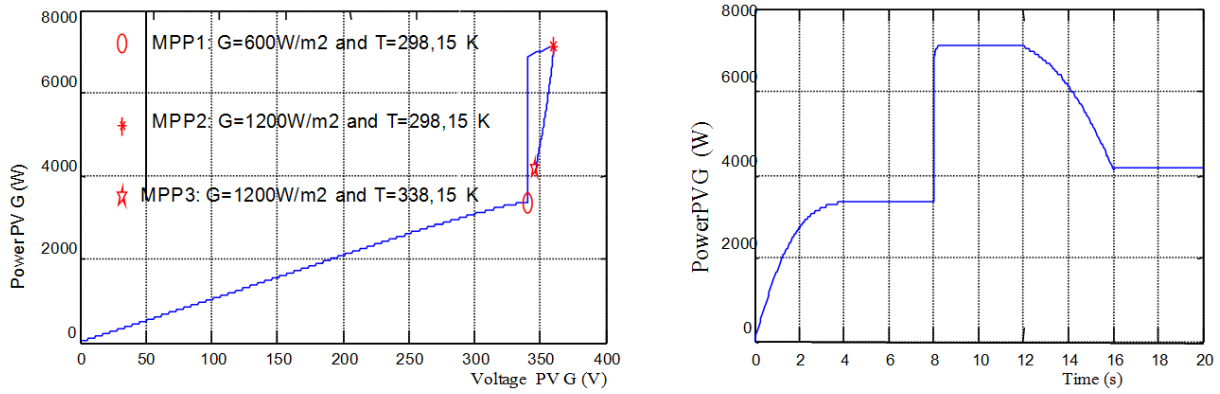
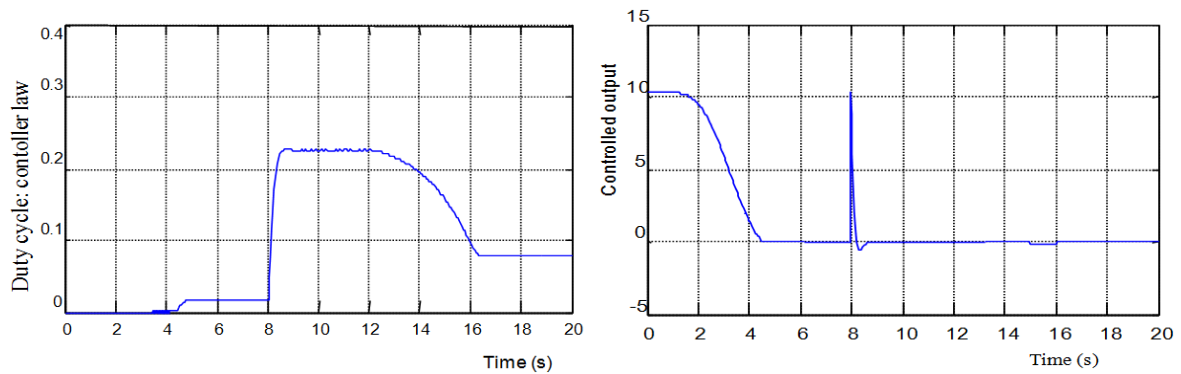


Figure 3.5 : la puissance en fonction de la tension et en fonction du temps

Le figure 3.6 , montre le comportement de la commande (le rapport cyclique). L'erreur de convergence reste toujours nulle.



Figures 3.6 : la loi de commande et la sortie du système.

### 3.2. Modèle mathématique incertain du système de pompage photovoltaïque

Le modèle mathématique d'un système réel telle qu'un pompage solaire contient forcément des incertitudes. Supposant que  $\xi$  est la fonction qui rassemble tous les incertitudes, et que  $|\xi| < B$  avec  $B$  est une constante connue. Le système perturbé est présenté sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + g \cdot u + \xi \end{cases} \quad (3.27)$$

La fonction d'incertitude couvre tous les termes négligés, et toutes les incertitudes sur les mesures reçu à partir des capteurs. Cette fois, la loi de commande doit être conçue pour un système plus réaliste qu'un système théorique nominal. Avec la commande par mode glissant on peut avoir une solution, cependant il y aura des limitations confrontées, et on va proposer des solutions pour les surmonter.

### 3.3. Commande par mode glissant standard d'un système incertain

#### 3.3.1. Elaboration de la loi de commande

La lois de commande par mode glissant  $u$  qui force la sortie du système à converger vers zero en temps fini est composé de deux termes,  $u_{eq}$  et  $u_s$ , selon la forme suivante[dah-16(1), dah-16(3)] :

$$u = u_{eq} + u_s \quad (3.28)$$

Avec  $u_{eq}$  est la commande équivalente qui détermine le comportement du système sur la surface de glissement et  $u_s$  est la commande non linéaire qui mène l'état du système vers la surface de glissement. En présence de perturbations et pendant la variation paramétriques, la composante non linéaire maintient le système sur cette surface.

Le degré relatif du système est  $r = 2$ , alors suivant la théorie du mode glissant, la surface de glissement sera définie comme suite :

$$s = \dot{e} + k_1 e \quad (3.29)$$

Avec  $k_1$  est une constante positive et  $\dot{e} = \dot{x}_1$  est la dérivée première de l'erreur.

La commande équivalente du système est obtenue par les conditions d'invariance :

$$s = 0 \text{ et } \dot{s} = 0 \Rightarrow u = u_{eq}$$

La commande équivalente est donnée par :

$$u_{eq} = -\frac{f + k_1 \dot{e}}{g} \quad (3.30)$$

La commande non linéaire  $u_s$  est calculée de façon suivante :

$$u_s = -\frac{k_2}{g} \text{sign}(s) \quad (3.31)$$

La constante  $k_2 > B$ , est choisie de sorte que la condition  $s\dot{s} < 0$  soit satisfaite. On obtient finalement la commande par mode glissant :

$$u = -\frac{1}{g}(k_2 \cdot \text{sign}(s) + f + k_1 \dot{e}) \quad (3.32)$$

#### 3.3.2. Stabilité de Lyapunov

On considère la fonction définie positive de Lyapunov comme suit :

$$V_1 = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.33)$$

La dérivée de cette fonction par rapport au temps est :

$$\dot{V}_1 = s\dot{s} = s(f + g \cdot u + \xi + k_1 \dot{e}) \quad (3.34)$$

En remplaçant (3.18) dans (3.20), on trouve:

$$\dot{V}_1 = s(\xi - k_2 \cdot \text{sign}(s)) = s \cdot \text{sign}(s)(\xi \times \text{sign}(s) - k_2) \quad (3.35)$$

Pour que la commande par mode glissant force l'état du système à converger vers zéro (la référence) il faut que la condition  $\dot{V}_1 < 0$  soit satisfaite. Alors la constante  $k_2$  doit être choisie suffisamment supérieure à  $\xi$ . Cependant, le choix d'une grande valeur de  $k_2$  fait apparaître un phénomène dit de réticence (chattering phenomenon). L'identification de ces incertitudes peut être une solution adéquate à ce problème au lieu d'agrandir la composante non linéaire comme il est proposé dans la section suivante.

### 3.4. L'identification des incertitudes de modélisation par la méthode des SVM.

L'avantage majeur de l'identification par les SVM est que le modèle incertain identifié est en relation seulement avec les entrées et les sorties du système et la détermination de toutes les dynamiques négligées qui sont difficiles à identifier n'est pas demandée. Comme il est vu dans la section précédente, les incertitudes de modélisation ont un effet négatif sur la stabilité du système. L'objectif de cette partie est d'estimer ces incertitudes de sorte que  $\hat{\xi}$  (la fonction estimée des incertitudes) soit très proche à  $\xi$ . L'étape suivante est l'intégration de cette fonction dans le corps de la lois de commande [dah-16(3)].

Lorsqu'un problème est non linéaire, l'ensemble des exemples d'apprentissages sont tracés dans un espace de dimension supérieur par une fonction  $\varphi(\cdot)$ , là où le problème d'optimisation admet une décision linéaire (linear pattern). La reconstruction de la solution trouvée est réalisée à l'aide de la fonction Noyau (Kernel function)  $\varphi(x) \cdot \varphi(y) = K(x, y)$  [Cri-00, Sch-02 et Sha-04].

On considère que  $(X, Y)$  est l'ensemble d'apprentissage considéré.

Avec :

$$X_{reel} = [I_{m_{reel}}, V_{m_{reel}}, \Omega_{reel}, I_{g_{reel}}, V_{g_{reel}}, I_{l_{reel}}]$$

$$X_{nom} = [I_{m_{nom}}, V_{m_{nom}}, \Omega_{nom}, I_{g_{nom}}, V_{g_{nom}}, I_{l_{nom}}]$$

$$X = X_{real} - X_{nom}$$

$$Y_{real} = f_{real} = f + \xi$$

$$Y_{nom} = f$$

$$Y = Y_{real} - Y_{nom}$$

$X_{real}$  et  $X_{nom}$  sont respectivement les composantes réelles et nominales du système de pompage photovoltaïque. L'ensemble d'apprentissage est donc :

$$T_{set} = \{X_k, \dots, X_i, \dots, X_{k-n}, Y_k, \dots, Y_i, \dots, Y_{k-n}\} \quad (3.36)$$

Avec  $X_i$  est la  $i^{eme}$  composante d'entrée et  $Y_i$  est la  $i^{eme}$  sortie correspondante.  $n$  est le nombre d'exemples d'apprentissage. L'objectif des SVM est de trouver une fonction  $\hat{\xi}$  qui satisfait  $Y = \hat{\xi}(X_k, \dots, X_{k-n}, Y_k, \dots, Y_{k-n})$ .

Suivant la théorie des SVM, il existe une fonction  $\varphi(\cdot)$  qui trace l'entrée dans un espace de dimension supérieure et un vecteur  $w$  dans cette dimension qui permettent de représenter la sortie  $Y$  en fonction de l'entrée  $X$  de la façon suivante :

$$Y(X) = w^T \varphi(X) + b \quad (3.37)$$

Où  $b$  est un biais pour le modèle de régression.

L'estimation commence par l'établissement du problème de minimisation suivant :

$$\min_{w,e} J(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad i = 1, \dots, n \quad (3.38)$$

Soumis aux contraintes égalités :

$$Y_i = w^T \varphi(X_i) + b + e_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.39)$$

Avec  $C$  est une constante de réglage du modèle des SVM,  $e$  est l'erreur de régression et  $n$  est le nombre des exemples d'apprentissage. La résolution de cette minimisation sous contraintes est faite par l'introduction du fonction de Lagrange suivante :

$$\mathcal{L}(w, b, e, \alpha) = J(w, e) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{w^T \varphi(X_i) + b + e_i - Y_i\} \quad (3.40)$$

Où les  $\alpha_i$  sont les multiplicateurs de Lagrange.

Les dérivées partielles de la fonction de Lagrange par rapport de  $w, b, e, \alpha$  sont :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi(X_i) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = C e_i \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow w^T \varphi(X_i) + b + e_i - Y_i = 0 \end{cases} \quad (3.41)$$

En remplaçant la première et la troisième formule de l'équation (3.41) à la quatrième formule, et sous contrainte de la deuxième formule, on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_n^T \\ 1_n & \Omega + C^{-1} I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Avec  $Y = [Y_1, \dots, Y_n]^T$ ,  $1_n = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$ ,  $I_n$  est une matrice  $n \times n$ ,  $n$  est le nombre de vecteurs supports,  $\Omega \in \mathbb{R}^{n \times n}$  est la matrice des noyaux (Kernel matrix) définit par  $\Omega_{ij} = \varphi(X_i)^T \varphi(X_j) = K(X_i, X_j)$ .

La résolution de (2.42), permet d'avoir l'estimation final sous la forme :

$$Y(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(X_i, X) + b = \xi \quad (3.43)$$

Comme l'une des fonctions noyaux les plus utilisées dans les machines d'apprentissage, la fonction gaussienne est souvent employée pour les problèmes de la régression non linéaire. La forme mathématique d'un noyau gaussien est :

$$K(X, X_i) = \exp\left(\frac{-\|X - X_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (3.44)$$

Avec  $\sigma$  est une constante positive. La figure suivante illustre le fonctionnement des SVM.

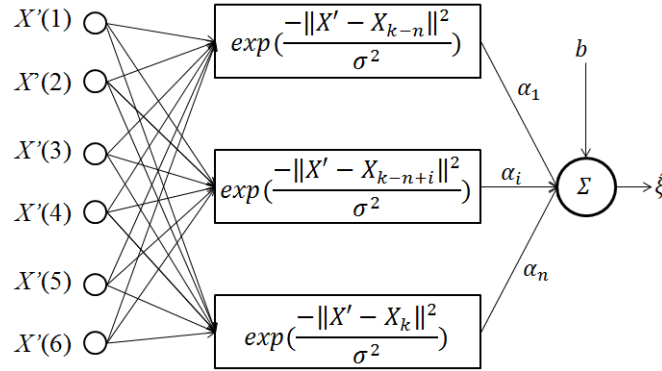


Figure 3.7: modèle LS-SVM pour l'identification du fonction non linéaire

### 3.5. Commande d'un système incertain par mode glissant à base des SVM

#### 3.5.1. Commande par la méthode de SVM-SMC

La commande proposée est une combinaison du mode glissant avec les algorithmes de SVM. Les incertitudes identifiées par la méthode des SVM sont introduites au sein de la loi de commande par mode glissant. Cela permet une bonne description du système et par la suite une valeur minimale de la composante non linéaire sera suffisante pour la vérification de stabilité. La commande SVM-SMC est établie comme suit [dah-16(3)]:

$$u_{SVM} = -\frac{1}{g} (f + k_1 \dot{e} + k_2 \cdot \text{sign}(s) + \xi) \quad (3.45)$$

Théorème 1 (commande par SVM-SMC Dahhani et al.)

La commande proposée en (3.45) force le système de pompage d'eau photovoltaïque à opérer au point de puissance maximale.

Preuve :

On considère la fonction de Lyapunov définie positive :

$$V_2 = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.46)$$

La dérivée de (3.46) est :

$$\dot{V}_2 = s\dot{s} = s(f + g.u_{SVM} + \xi) \quad (3.47)$$

La substitution de (3.47) dans (3.45) donne :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= s(\xi - \hat{\xi} - k_2.sign(s)) \\ &= s(\varepsilon - k_2.sign(s)) = s(sign(s))(\varepsilon.sign(s) - k_2) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Avec  $\varepsilon = \xi - \hat{\xi}$  est l'estimation de l'erreur. Pour satisfaire la condition  $\dot{V}_2 < 0$ , on choisi  $k_2$  tel que la condition suivante soit satisfaite :

$$k_2 > |\varepsilon| \quad (3.49)$$

Parce que  $\hat{\xi}$  est très proche de  $\xi$ , l'erreur  $\varepsilon$  est très petite. Alors, juste une petite composante non linéaire sera demandée dans la SMC.

### Résultat

La commande SVM-SMC peut forcer le système de pompage d'eau photovoltaïque à fonctionner au point de puissance maximal sans réticences et sans dynamiques des hautes fréquences peut importe le niveau d'incertitudes.

## **3.5.2. Validation de la commande SVM-SMC par simulation**

### **3.5.2.1. Paramètres du système commandé**

Les paramètres considérés du système étudié dans ce chapitre sont les suivants :

Le panneau photovoltaïque SM55:

$$R_s = 0.1124\Omega, \quad R_{sh} = 6500\Omega, \quad \gamma = 1.7404, \quad I_{SCR} = 3.45A, \quad I_{or} = 4.842\mu A, \quad K_I = 4.10^{-4}A/K, \quad \text{and} \\ T_r = 298.15K$$

Le moteur a courant continue:

$$V_{mn} = 400V, \quad I_{mn} = 12.2A, \quad \Omega_n = 104.7 \text{ rad/s}, \quad R = 9.84\Omega, \quad L = 0.12H, \quad J = 0.06Kgm^2$$

Le hacheur (convertisseur DC/DC)

$$L_i = 3.5mH, \quad C_i = 47mF, \quad C_o = 4.7mF$$

La pompe centrifuge

$$K_r = 28.10^{-4}w(s/rad), \quad \Omega_n = 104.7 \text{ rad/s.}$$

La partie inconnue du système est :  $\xi = 20 \times \sin(t)$

### 3.5.2.2. Organisation de validation

Cette nouvelle stratégie de commande sur des système de pompage PV sera validée sur trois cas :

1<sup>er</sup> Cas : système de pompage photovoltaïque commandé par SMC standard,

Dans ce cas, la commande par SMC est appliquée sur un système nominal. Les résultats de simulation du rapport cyclique, la vitesse de rotation, et la puissance extraite du GPV sont représentés respectivement dans les figures suivantes (fig. 3.8, 3.9 et 3.10) montrent la convergence et la stabilisation sur les valeur de références.

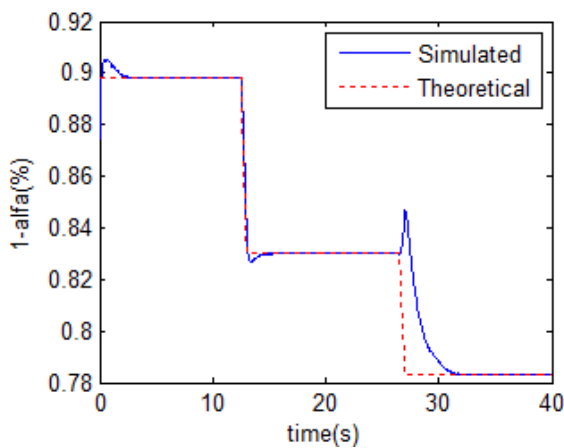


Figure 3.8 : la commande  $u = 1 - \alpha$

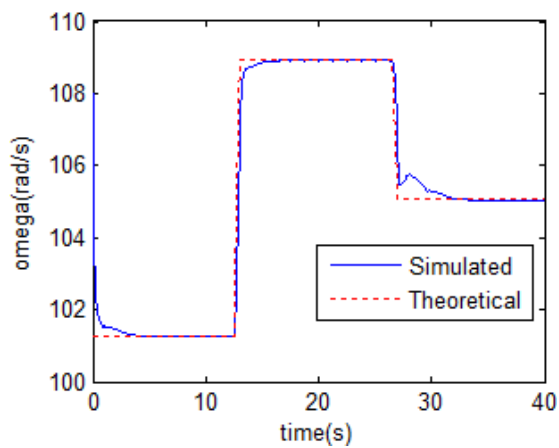


Figure 3.9 : la vitesse de rotation de la pompe

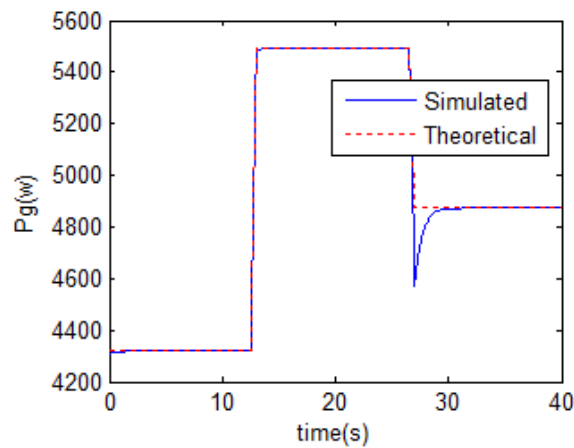


Figure 3.10 : la puissance extraite du GPV

2<sup>ème</sup> Cas : système réel de pompage PV commandé par SMC standard.

Dans ce cas, la SMC standard est appliquée sur un système nominal mais injectée par un modèle qui n'est pas pris en compte dans la loi de commande. Cela est traité de point de vue commande comme des incertitudes de modélisation. Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 montrent l'effet des ces incertitudes sur les performances du système.

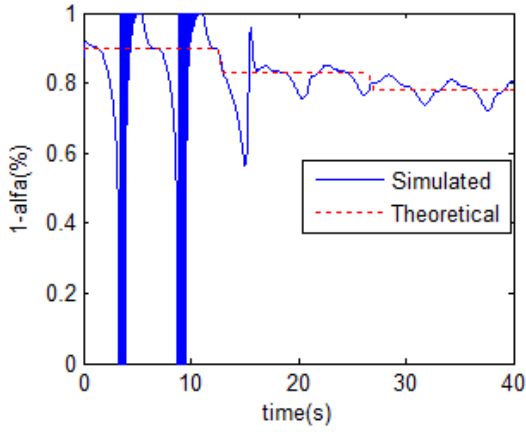


Figure 3.11 : la commande  $u = 1 - \alpha$

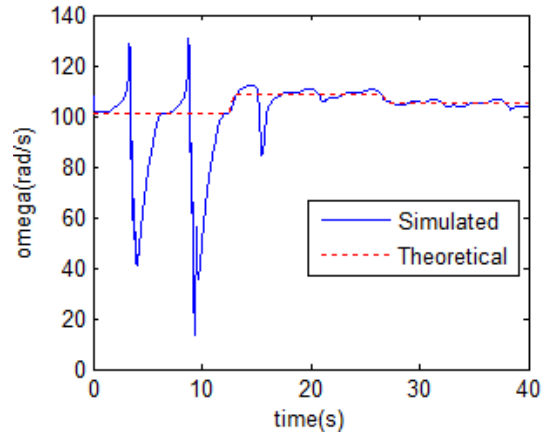


Figure 3.12 : la vitesse de rotation de la pompe

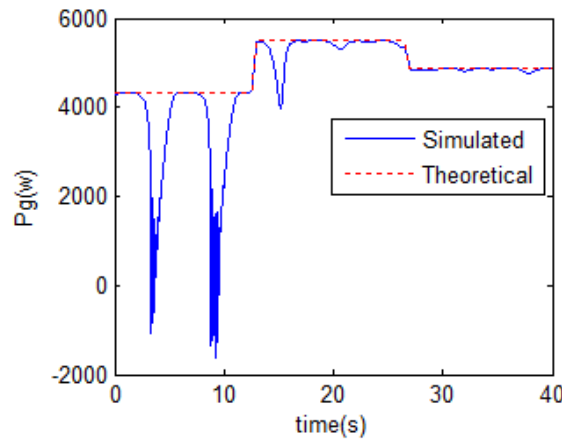


Figure 3.13 : la puissance extraite du GPV

3<sup>ème</sup> Cas : système réel de pompage PV commandé par SVM-SMC.

C'est la commande SVM-SMC qui est appliquée maintenant sur le système du 2<sup>ème</sup> cas (système incertain). Les figures 3.14, 3.15 et 3.16 montrent que l'effet perturbateur des incertitudes est inactif et que la convergence est parfaite.

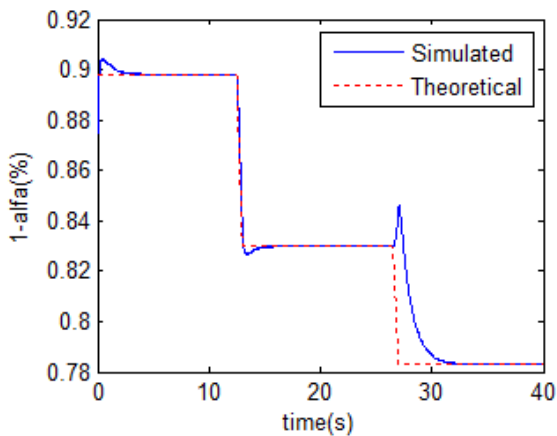


Figure 3.14 : la commande  $u = 1 - \alpha$

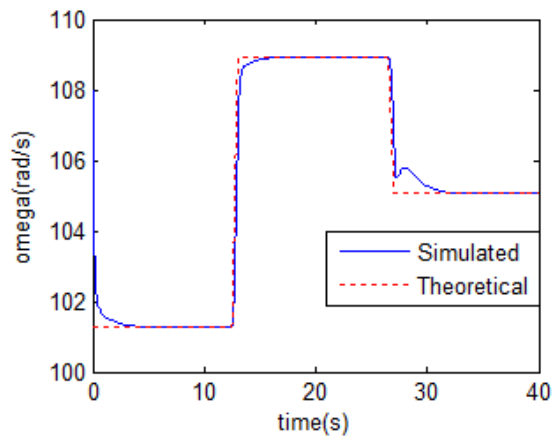


Figure 3.15 : la vitesse de rotation de la

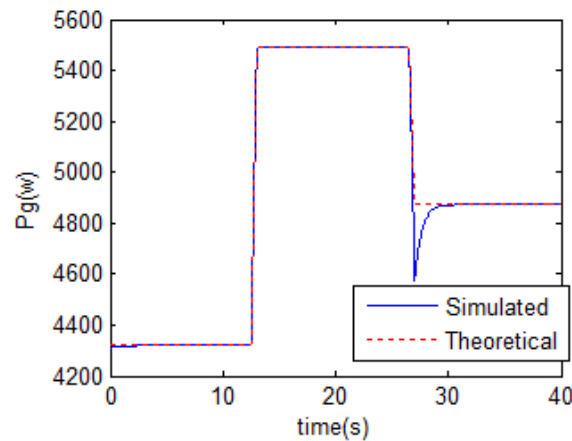


Figure 3.16 :la puissance extraite du GPV

#### 4. Commande par la méthode de P&O adaptative à base des SVM

La commande par la méthode de P&O ne nécessite pas la modélisation mathématique du système photovoltaïque. Cet avantage est dû à la propriété du générateur PV qui accepte un seul PPM. Ce point n'est achevé que si la dérivée de la puissance générée par rapport au voltage de sortie est nul. Grace à sa simplicité, et sa performance un peu plus que moyen, la méthode de P&O demeure le premier choix aux applications de commande des systèmes PV.

##### 4.1. De la commande de P&O standard à la commande adaptative

Le principe de fonctionnement du P&O est basé sur la variation de la grandeur  $\frac{\Delta P}{\Delta V}$  ; Le point de fonctionnement est perturbé périodiquement en incrémentant et décrémentant le voltage du générateur PV. La puissance générée est comparée avant et après la perturbation. La prochaine perturbation sera la même que l'ancienne si la puissance générée augmente, ou avec signe inverse si la puissance diminue. Lorsque le processus atteint la puissance maximal, le voltage de la sortie demeure s'incrémenter et se décrémenter, et le point de fonctionnement demeure en oscillation autour du PPM même si les conditions climatiques sont stables. Alors le problème dans la méthode de P&O vient principalement du pas fixe de la perturbation. En effet, une perturbation à pas large améliore le taux de convergence, mais elle crée des grandes oscillations autour du PPM. Par ailleurs, une perturbation à pas petit diminue les oscillations, mais elle affaiblit le taux de convergence. Pour garder les avantages et surmonter les problèmes, beaucoup de chercheurs ont essayé d'augmentés le pas de perturbation lorsque le PPM est loin en raison d'augmenter le taux de convergence. Le pas commence à diminuer lorsque le PPM devient plus en plus proche. Et c'est ce qu'on appelle une méthode de P&O adaptative [dah-15(1)].

La loi de commande par la méthode de P&O est régie par la relation suivante:

$$D(k) = D(k - 1) + \Delta D(k) \quad (3.50)$$

Avec  $\Delta D(k) = \eta(k) \cdot \text{sign}(\Delta P(k - 1)) \cdot \text{sign}(\Delta V(k - 1))$  est la perturbation du rapport cyclique.  $\Delta V$  et  $\Delta P$  sont respectivement la variation du voltage et de la puissance.

L'effet adaptatif est introduit par le terme  $\eta(k) = z \cdot \eta(k - 1)$ .

Le terme  $z$  est une variable positive qui satisfait la conditions suivantes :

$$z = \begin{cases} z_{high} > 1 & \Delta P(k - 1) > 0 \\ 0 < z_{Low} < 1 & otherwise \end{cases} \quad (3.51)$$

Avec :  $\text{sgn}(f(k)) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(k) > 0 \\ -1 & \text{if } f(k) < 0 \\ 0 & \text{if } f(k) = 0 \end{cases}$  est la fonction signe

Le pas de perturbation est multiplié par le facteur  $z_{high}$  qui est légèrement supérieur à "1"(un) pour augmenté le taux de convergence lorsque la puissance augmente. Le pas est multiplié par un facteur  $z_{Low}$  inferieur à un lorsque la puissance diminue. Une borne supérieure du pas de perturbation doit être définit pour empêcher l'instabilité.

Le pas dans le P&O standard est fixe, ce qui signifie l'inflexibilité du processus commandé avec les changements climatiques.

## 4.2. Modélisation du PPM du système PV par la méthode SVM

Dans la présente partie, le comportement de MPP dans différentes illuminations est traité comme un problème non-linéaire de régression. SVM est utilisé pour modéliser la relation complexe entre le rapport cyclique et l'illumination. L'avantage principal de l'utilisation de la méthode SVM pour la commande du système de pompage, c'est la facilité de d'exécution et d'application. Le modèle MPP conçue par SVM est formé hors-ligne avec un nombre réduit des exemples d'apprentissages [Suy-99].

On considère un ensembles des exemples d'apprentissage qui contient N éléments  $\{X_i, Y_i\}_{i=1}^n$  avec,  $X_i$  et  $Y_i$  représentent respectivement la  $i^{ème}$  échantillon d'illumination et le rapport cyclique correspondant.

Suivant la théorie des SVM, il existe un vecteur  $w$ , une fonction  $\varphi(.)$  et un biase  $b$  qui permettent de représenter X en fonction de Y sous forme:

$$Y(X) = w^T \varphi(X) + b \quad (3.52)$$

En poursuivant l'enchainement de SVM (voir la partie "L'identification des incertitudes de modélisation par la méthode des SVM"), on trouve finalement :

$$\hat{Y}(X_{actuelle}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i k(X_{actuelle}, X_i) + b \quad (3.53)$$

Avec  $X_{actuelle}$  est la mesure de l'illumination solaire actuelle, et  $\hat{Y}$  est la valeur estimée du rapport cyclique. La fonction choisie est un noyau gaussien  $K(X_i, X_j) = \exp(-\|X_i - X_j\|^2 / \sigma^2)$ . Le tableau 3.1 (Annexe), présente les paramètres hors-lignes du modèle de PPM. Les figures 3.17 et 3.18 illustrent respectivement le diagramme des SVM et la précision d'estimation pour dix échantillons.

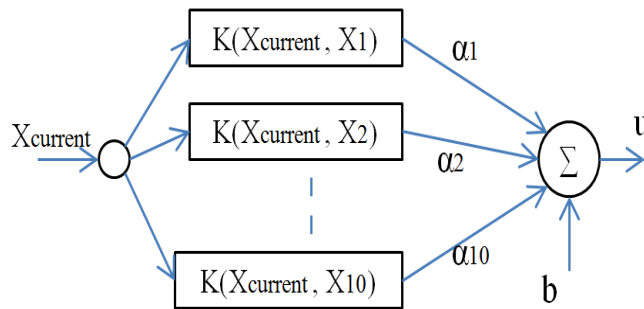


Figure 3.17 : illustration du fonctionnement de SVM

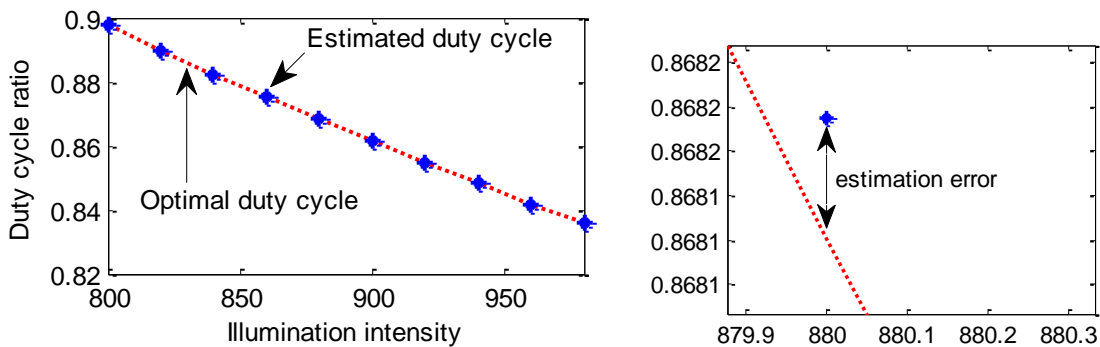


Figure 3.18 : précision de l'estimation par SVM

### 4.3. Commande par la méthode de P&OA à base de SVM.

Les conditions climatiques, suivant la région et la saison, changent lentement ou brusquement. La stratégie de commande proposée est basée sur ces deux cas. Lorsque l'intensité de l'illumination est pratiquement stable (changement lent), seul la commande par P&OA peut conduire le système d'une manière optimale. L'estimation par SVM est lancée lorsque les changements sont considérables ; à ce moment, le modèle de PPM a priori conçu, reçoit la valeur de l'illumination et retourne la valeur du rapport cyclique qui mène l'état du système au voisinage du PPM. Ensuite, la commande P&OA garde le système en fonctionnement optimal (figure 3.19) [Buy10].

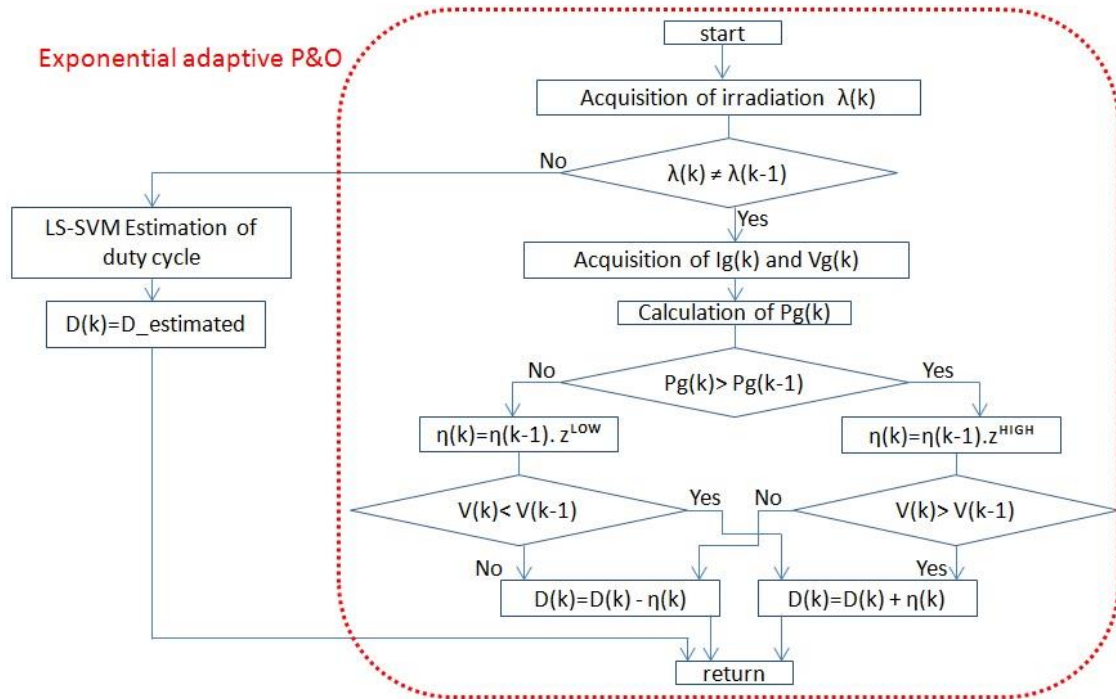


Figure 3.19 : Organigramme de la stratégie de commande proposée

Pour mieux comprendre la stratégie suivie, la figure 3.20, présente le comportement de l'état du système lors de l'application de cette commande. Supposons que le point de fonctionnement est en position A, si la commande P&OA est appliquée, ce point converge d'une manière exponentiel vers le PPM (figure 3.20-a), et il le dépasse à cause de l'effet exponentiel. Pour surmonter ce problème, et comme une prévention de l'instabilité, une limite doit être appliquée sur le terme  $\eta$ . D'autre part, on suppose que le point A peut se déplacer (sauter) en un seul cycle vers le voisinage PPM (figure 3.20-b), et le P&OA élimine l'erreur d'estimation et garde le système en fonctionnement optimal. Comme ça, les oscillations autour du PPM sont réduits, le temps de convergence et la stabilité sont amélioré. La mise en ouvre de cette stratégie de commande nécessite le passage par les étapes suivantes [dah-15(1)]:

- Echantillonnage de la plage d'illumination possible.
- Pour chaque échantillon, ajuster manuellement le rapport cyclique optimal.
- Etablissement du modèle SVM qui accepte l'illumination comme entrée et le rapport cyclique comme sortie.
- Conception d'une stratégie qui permet d'activer le modèle SVM pour l'estimation du rapport cyclique seulement si les conditions climatiques varient brusquement.
- Lorsque le modèle SVM est activé, le P&OA est initialisé par la nouvelle valeur du rapport cyclique.
- Le rôle du P&OA est d'attraper l'erreur d'estimation et de garder le système en fonctionnement optimal tant que les conditions climatiques sont stables.

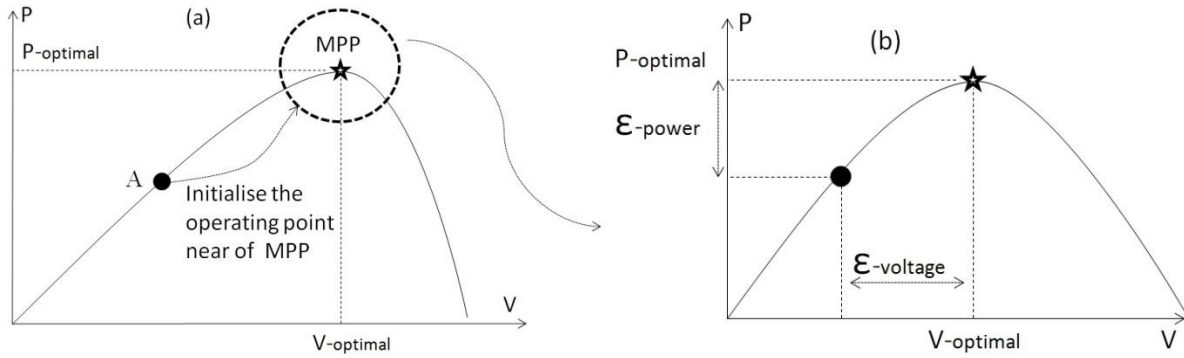


Figure 3.20 :(a) initialisation du point de fonctionnement au voisinage du PPM.  
(b) l'erreur résiduelle de l'estimation.

#### 4.3.1. Discussion de la convergence et de la stabilité.

Il y a quatre combinaisons de  $\Delta P$  et  $\Delta V$  lors de la poursuite du point de puissance maximale. On suppose que le pas de perturbation est borné par une valeur minimale  $\eta_{min}$  et une autre maximale  $\eta_{max}$  pour éviter des pas de perturbation très larges qui peuvent causer l'instabilité [Buy-10] [dah-15(1)].

##### Cas 1 : $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$

Dans ce cas, cet algorithme peut être simplifié sous la forme suivante:

$$D(k) = D(k - 1) + \eta(k)$$

$$\text{Avec } \eta(k) = \begin{cases} z_{high} \cdot \eta(k - 1) & \text{if } \eta(k - 1) \leq \eta_{max} \\ \eta_{max} & \text{if } \eta_{max} \leq \eta(k - 1) \end{cases}$$

Dans ce cas, la puissance et la perturbation augmentent. L'algorithme continue à augmenter le pas de la perturbation pour converger vite vers le PPM. En Supposant que  $D_{opt}$  est le rapport cyclique optimal. Lorsque la transition de  $D < D_{optimal}$  à  $D > D_{optimal}$  survient, la puissance du système augmente (et le cas 1 est toujours actif) ou diminue et le système est forcé au 2<sup>eme</sup> cas .

##### Cas 2 : $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$

L'algorithme est simplifié maintenant à :

$$D(k) = D(k - 1) - \eta(k)$$

$$\text{Avec } \eta(k) = \begin{cases} z_{low} \cdot \eta(k - 1) & \text{if } \eta_{min} \leq \eta(k - 1) \\ \eta_{min} & \text{if } \eta(k - 1) \leq \eta_{min} \end{cases}$$

La puissance diminue et le pas de perturbation augmente. La commande va procéder à inverser le signe et à diminuer le pas de la perturbation. De cette façon, le système sera forcé soit au 3<sup>ème</sup> cas si la puissance devienne positive, soit au 4<sup>ème</sup> cas.

Cas 3 :  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V < 0$

L'algorithme est simplifié à :

$$D(k) = D(k - 1) - \eta(k)$$

$$\text{Avec : } \eta(k) = \begin{cases} z_{high} \cdot \eta(k - 1) & \text{if } \eta(k - 1) \leq \eta_{max} \\ \eta_{max} & \text{if } \eta_{max} \leq \eta(k - 1) \end{cases}$$

Inversement au 2<sup>ème</sup> cas , cette fois la puissance augmente et la perturbation diminue avec un grand pas pour atteindre le PPM plus rapidement. Lorsque la transition de  $D > D_{optimal}$  à  $D < D_{optimal}$  survient, la puissance : augmente et le 3<sup>ème</sup> est toujours actif, ou diminue et le système sera forcé à converger vers le 4<sup>ème</sup> cas.

Cas 4 :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V < 0$

L'algorithme est simplifié à :

$$D(k) = D(k - 1) + \eta(k)$$

$$\text{Avec } \eta(k) = \begin{cases} z_{low} \cdot \eta(k - 1) & \text{if } \eta_{min} \leq \eta(k - 1) \\ \eta_{min} & \text{if } \eta(k - 1) \leq \eta_{min} \end{cases}$$

Dans ce cas, la puissance et le pas de perturbation diminuent tout les deux. Pour augmenter la puissance, l'algorithme inversera le pas de perturbation. Cela va forcer le système à retourner vers le 1<sup>er</sup> cas si la variation de la puissance devient positive. Sinon le système se retrouve dans le 2<sup>ème</sup>.

On trouve finalement que le système converge dans tous les cas pour garder toujours la puissance maximale. La méthode EAP&O assure la stabilité quelque soit les dynamiques du systèmes.

Cette étude demeure toujours vraie lorsqu'on combine la méthode EAP&O avec SVM parce que le système va opérer au voisinage du PPM.

### 4.3.2. Validation de la commande EAP&O à base de SVM par simulation

Dans cette partie, le P&O standard (représenté par une ligne bleu pointillée), P&OA (représenté par une ligne noire pointillée) et le P&OA à base de SVM (représenté par une ligne rouge) sont appliqués sur le même système de pompage d'eau PV. En deux scenarios possibles, les résultats

importants de simulation du rapport cyclique, la puissance du GPV et la vitesse angulaire de la pompe sont présentés pour montrer les performances de la stratégie de commande proposée.

Tous les résultats trouvés sont comparés avec les résultats théoriques (illustrés par une ligne verte pointillée). Pour obtenir ces résultats théoriques, on va résoudre le système d'équation composé par (3.2), (3.8), (3.11), (3.12) et par l'équation  $\frac{\partial P_g}{\partial V_g} = V_g \cdot \frac{\partial I_g}{\partial V_g} + I_g = 0$ . Il y a sept équations avec sept variables inconnues qui sont ;  $I_g, V_g, I_L, I_m, V_m, \Omega$  et  $u$ . Les solutions obtenues sont optimales et correspondent au PPM. Dans ce travail le système du modèle est considéré inconnue, et le déficit est de faire commander ce système d'une manière optimale.

Cas 1 : Scenario du changement brusque en illumination

Pendant cette simulation, on commence par 900 Watt / m<sup>2</sup> comme intensité d'éclairage, et on change brusquement la valeur à 1000 Watt / m<sup>2</sup> après 10 secondes. Après 15 secondes, on change de nouveau la valeur à 800 Watt / m<sup>2</sup>.

Le rapport cyclique est l'outil important de la commande. C'est la composante responsable à forcer l'ensemble du système à fonctionner de manière optimale. Lorsque l'éclairage change brusquement, on remarque que le P&OA soutenu par SVM rejoint rapidement l'optimal (figure 3.21), car une fois l'éclairage est modifiée, une nouvelle valeur du rapport cyclique est estimée et utilisée pour mettre à jour le P&OA, tandis que les méthodes P&O demandent plusieurs secondes. Cette différence de performance a un effet direct sur la puissance générée (figure 3.22), le courant et la tension GPV (figure 3.23). Par conséquent, cette différence affectera la vitesse de rotation de la pompe (figure 3.24).

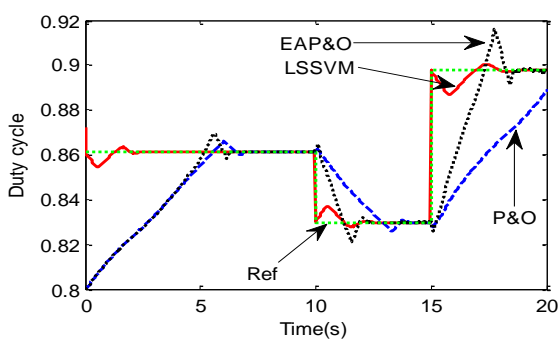


Figure 3.21 : rapport cyclique

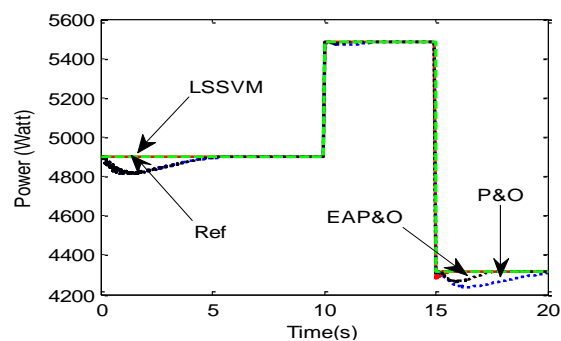


Figure 3.22 : la puissance du GPV

Cas 2 : scenario du changement en rampe

Cette fois, un profil plus réaliste est appliqué. Un changement d'éclairage trapézoïdal est proposé. La simulation commence avec 900 Watt/m<sup>2</sup> à 1000, 800, 1100, 700 respectivement à 0, 7, 11, 15 et 20 secondes.

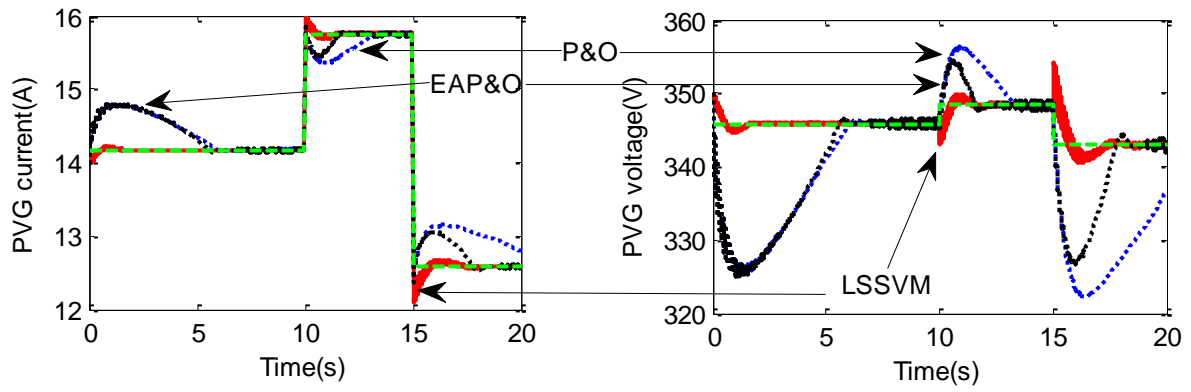


Figure 3.23 : Courant et voltage du GPV

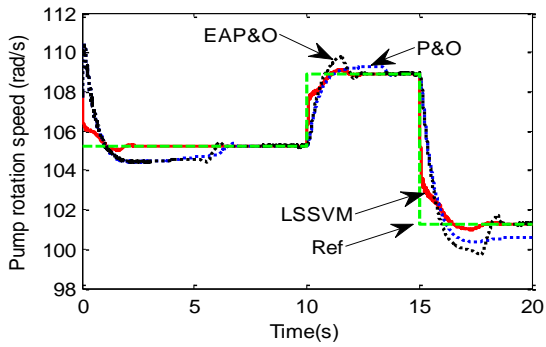


Figure 3.24 : La vitesse angulaire de la pompe

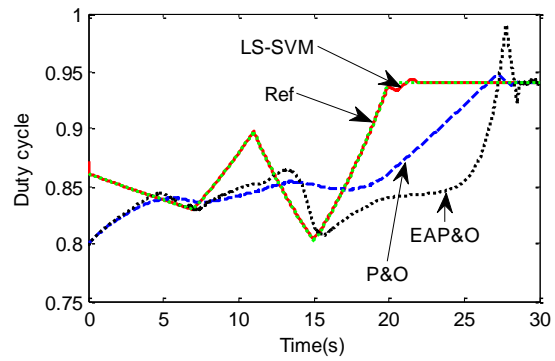


Figure 3.25 : Rapport cyclique

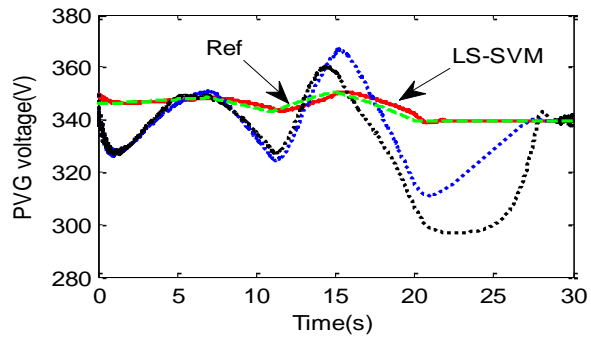
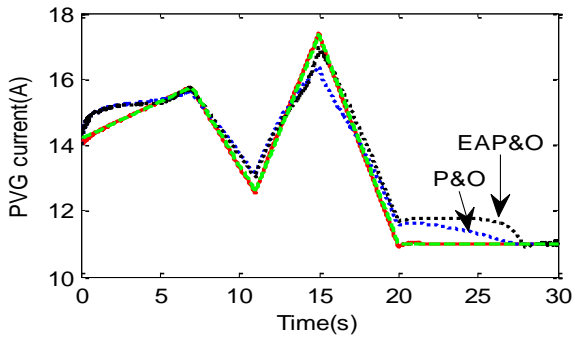


Figure 3.26 : Voltage et courant du GPV

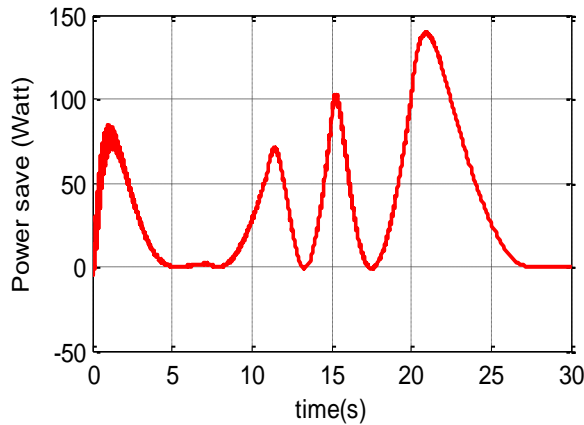


Figure 3.27: La puissance économisée.

Contrairement aux méthodes P&O, il est remarqué sur la figure 3.25, que le rapport cyclique dans P&OA basé sur SVM suit parfaitement la référence. Ainsi, la tension et le courant du GPV poursuivent les valeurs optimales (figure 3.26). A la figure 3.27, elle est présentée la puissance économisée. C'est la soustraction des puissances générées par l'assistance SVM et sans assistance. Dans une grande centrale photovoltaïque, l'utilisation de la méthode proposée permettrait d'économiser une plus grande quantité d'énergie.

## 5. Conclusion

Dans ce travail, une version adaptative exponentielle de P&O est combinée avec la technique intelligente SVM, pour avoir une nouvelle stratégie de commande pour le système de pompage d'eau PV. Cette combinaison a assuré une convergence rapide avec de faibles oscillations du système. Le principe de base de ce contrôle est d'initier (mettre à jour) l'P&OA près du point de fonctionnement optimal à chaque changement d'éclairage. Plus simplement, le modèle de PPM initialise le système dans le voisinage des conditions optimales, et le contrôleur P&OA force le système à opérer au PPM. Pour valider le contrôleur proposé, un système photovoltaïque de pompage d'eau est modélisé et piloté dans tous les scénarios possibles de changement climatique. Ce contrôleur s'est avéré efficace en termes de taux de convergence, de stabilité et de précision. Comparé à P&O standard et P&OA, le P&OA à base de SVM montre vraiment les améliorations introduites dans des simulations MATLAB-SIMULINK.

Le P&OA à base de SVM prouve d'être une technique de commande plus fiable pour les systèmes photovoltaïques voyant les critères suivants:

- Le rendement élevé à l'extraction de la puissance maximale en poursuivant la référence optimale.
- La simplicité et le coût économique réduit d'exécution grâce au aux besoins limités des sondes (capteurs).
- Le maintien de la mécanique grâce au manque des vibrations dans la commande.

D'autres études se concentreraient sur l'implémentation de la commande proposée sur un dispositif électronique. Ensuite, l'approche pourra être étendu pour couvrir une grande centrale photovoltaïque injectant l'énergie au réseau électrique.

## CHAPITRE 4 :

### Commande d'un système éolien / hydrolienne

#### 1. Introduction

L'énergie éolienne est la source d'énergie la plus fiable et la plus durable. Grâce à sa propreté, son abondance et son faible coût d'entretien, l'énergie éolienne devient un concurrent sérieux de tous les autres types d'énergie renouvelables et conventionnelles. L'énergie renouvelable éolienne va contribuer à renforcer la sécurité énergétique, réduire les émissions des gazes à effet de serre et la création des opportunités d'emploi. Les perspectives d'augmentation de la production de cette énergie nécessite le développement des outils et des méthodes de production efficaces. Les éoliennes installées au passé étaient à vitesse fixe, ce qui rend leurs rendements très faible. L'introduction des éoliennes à vitesses variables apportent un gain important au niveau de l'énergie produite. Le problème réside essentiellement à la nature fluctuante du vent. Les stratégies de commande peuvent avoir une solution qui met en objectifs les principes suivants.

- Maximiser la puissance produite à vent faible.
- Limiter la puissance à vent fort.
- Entretenir la mécanique de l'éolienne.

Beaucoup de chercheurs ont proposés des schémas de commande dans la littérature et des stratégies pour mettre la tâche plus facile. la commande par mode glissant, la commande gaussienne quadratique linéaire, la commande H-inf, la commande prédictive, sont des techniques largement connue dans la littérature, et il ont un principe commun de fonctionnement. L'implémentation de ces techniques en réalité demande beaucoup de mesures qui sont pratiquement imprécises. Cela pourra réduire les performances du système éolien et peut provoquer l'instabilité dans certaines conditions. Pour résoudre cette déficience, des techniques d'intelligence artificielles sont combinées à ces méthodes classiques de commande. La logique de Fuzzy, les réseaux de neurones artificiels ont bien trouvé leurs applications à la commande. Ces nouvelles méthodes peuvent être utilisés pour remplacer ou réduire l'utilisation des capteurs en estimant les grandeurs au lieu de les mesurer. Petkovic et al, Nikolic et al, on proposés une technique d'estimation basée sur la technique neuro-fuzzy.

## 2. Commande d'un système éolien

### 2.1. Modélisation du système éolien

La quantité d'énergie interceptée par une turbine éolienne placée dans un flux de vent est importante. L'équation de l'aérodynamique est donnée comme suite :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.1)$$

Avec  $\rho$  est la densité de l'air ( $\rho \sim 1.025 \text{ Kg/m}^3$ )  $A$  est la surface balayée par le rotor de la turbine (la surface du rotor qui affronte le courant d'air),  $V$  est la vitesse du vent. A partir d'une surface du rotor de  $20\text{m}^2$ , et suivant l'équation (4.1) il est prévu que pour 5, 10 et 15 m/s, la turbine intercepte 80, 644 et 2173 KW, respectivement. La turbine doit fonctionner d'une manière efficace dans une large plage de puissance, spécialement avec des fluctuations et des turbulences occasionnelles lorsque le vent est en changement rapide. La puissance capturée sous forme mécanique dans l'arbre du rotor est exprimée comme [Ass-15]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (4.2)$$

Ou  $C_p$  est le facteur de puissance. Il est pratiquement compris entre 0.35 et 0.5. Ce facteur est limité par la forme aérodynamique de la turbine. La partie mécanique d'une turbine à vitesse variable est considéré dans ce chapitre. Le couple aérodynamique est exprimé comme étant le rapport de la puissance et la vitesse angulaire de la turbine :

$$T_a = \frac{1}{2} C_p \rho A R V^2 / \lambda \quad (4.3)$$

Le coefficient de la puissance  $C_p$  dépend de l'angle de calage  $\beta$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$  comme il sont illustrées dans la figure (4.1). A la zone II (sous les conditions nominales), le paramètre  $\beta$  doit être égale à zéro pour convertir le maximum de puissance disponible, et  $\lambda$  est exprimée comme suite:

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{V} \quad (4.4)$$

Avec  $\omega_t$  est la vitesse de rotation et  $R$  est le rotor de la turbine.

Les dynamiques du rotor est une équation différentielle du première ordre exprimée par le couple aérodynamique  $T_a$ , le couple de l'arbre a basse vitesse  $T_{ls}$  et la vitesse angulaire du rotor :

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (4.5)$$

$K_r$  et  $J_r$  sont respectivement le facteur d'atténuation, et l'inertie du rotor.

L'équation du générateur aérodynamique  $T_{em}$  est donnée par :

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \tag{4.6}$$

Ou  $\omega_g$  et  $T_{hs}$  sont respectivement la vitesse de rotation du générateur asynchrone a double alimentations (GADA) et le couple de l'arbre à haute vitesse.  $J_g$  et  $K_g$  sont respectivement l'inertie du générateur et le coefficient de friction. La partie mécanique de l'éolienne à deux masses est présentée en espace d'état comme suite (fig. 4.2) [Cav-12, Bou-10]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} T_a + \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \end{bmatrix} T_{em} \tag{4.7}$$

Où  $a_{11} = -K_r/J_r$  ;  $a_{12} = 0$  ;  $a_{13} = -1/J_r$  ;  $a_{21} = 0$  ;  $a_{22} = -K_g/J_g$  ;  $a_{23} = 1/(n_g J_g)$  ;  
 $a_{31} = B_{ls} - K_{ls}K_r/J_r$  ;  $a_{32} = (K_{ls}K_g/J_g - B_{ls})/n_g$  ;  $a_{33} = -K_{ls}(J_r + n_g^2 J_g)/(n_g^2 J_g J_r)$  ;  $b_{11} = 1/J_r$  ;  
 $b_{21} = 0$  ;  $b_{31} = K_{ls}/J_r$  ;  $b_{12} = 0$  ;  $b_{22} = 0$  ;  $b_{32} = K_{ls}/n_g J_g$  ;

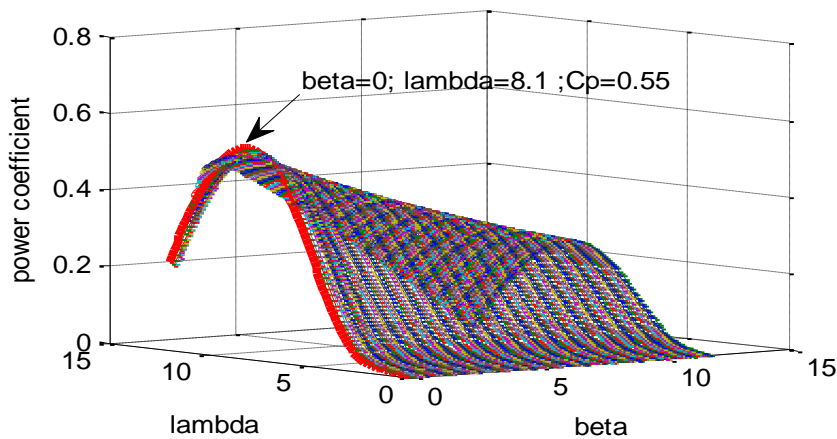


Figure 4.1 : le coefficient de puissance en fonction de l'angle de calage et la vitesse spécifique

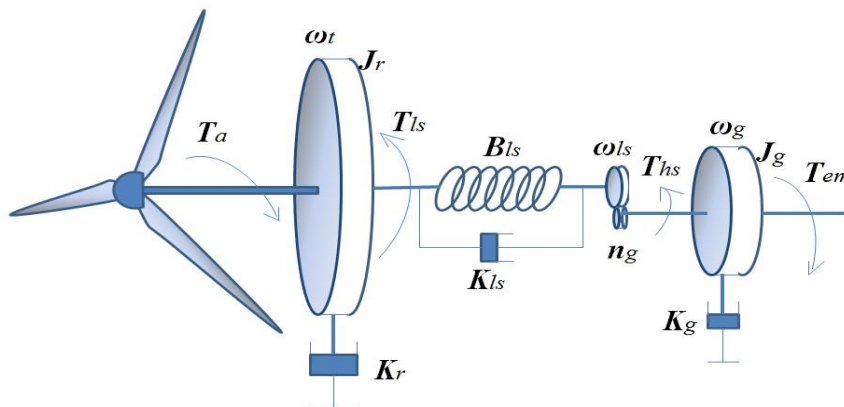


Figure 4.2 : turbine éolienne à deux masses

## 2.2. La stratégie de commande par mode glissant

La vitesse spécifique  $\lambda$  est un terme important. Il dépend de la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne, la vitesse du vent et du coefficient de puissance (limité à un rapport de 0.43). Dans le but de maintenir  $\lambda$  optimal et  $C_p=0.43$ , sachant que la vitesse du vent est incontrôlable, il faut contrôler la vitesse du rotor pour qu'elle converge vers  $\omega_{topt} = \frac{\lambda_{opt}}{R}V$  à travers la commande du couple électromagnétique  $T_{em}$  [dah-18].

On définit  $x_1 = \omega_t$  comme étant l'état du système. Le modèle du système d'équations (4.7) pourra être écrit en espace d'état sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, \omega_g, T_a, \dot{T}_a) + gT_{em} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4.8)$$

$T_{em}$  est l'entrée du système et  $y$  est la sortie du système. Les fonctions  $f$  et  $g$  sont calculées comme suite :

$$f(x_1, x_2, \omega_g, T_a, \dot{T}_a) = (a_{13}a_{31} - a_{11}a_{33})x_1 + (a_{11} + a_{33})x_2 + a_{13}a_{32}\omega_g + (a_{13}a_{33} + a_{13}b_{31})T_a + b_{11}\dot{T}_a \quad (4.9)$$

$$g = a_{13}b_{32} \quad (4.10)$$

L'erreur à suivre est choisie comme suit:

$$e = x_1 - \omega_{topt} \quad (4.11)$$

Le degré relatif est :

$$r = 2 \quad (4.12)$$

Suivant la théorie de la commande par mode glissant, la surface de glissement est :

$$S = \dot{e} + ke \quad (4.13)$$

Le paramètre  $k$  est une constante choisie positive. La première dérivée positive de l'erreur de poursuite est calculée comme :

$$\dot{e} = \dot{x}_1 - \dot{\omega}_{topt} \quad (4.14)$$

La deuxième dérivée sera :

$$\ddot{e} = \dot{x}_2 - \ddot{\omega}_{topt} \quad (4.15)$$

La commande équivalente (de la commande par mode glissant) est obtenue à partir des conditions d'invariances ;  $S = 0$  et  $\dot{S} = 0 \Rightarrow T_{em} = T_{em-equivalent}$

La commande équivalente est :

$$T_{em-equivalent} = -(f + kx_2 - \ddot{\omega}_{topt} - k\dot{\omega}_{topt})/g \quad (4.16)$$

La CMG contient aussi une entrée non linéaire (commutation) qui est définie comme suit :

$$T_{em-sign} = -L \cdot \text{sign}(S)/g \quad (4.17)$$

$L$  est le gain de commutation. Il doit être choisi prudemment pour éviter l'instabilité causée par les incertitudes de modélisation et aussi pour atténuer le phénomène de réticence.

Finalement le mode glissant est la combinaison de la commande par commutation et la commande équivalente [dah-18]:

$$T_{em-SMC} = -(f + Kx_2 - \ddot{\omega}_{topt} - k\dot{\omega}_{topt} + L \cdot \text{sign}(S))/g \quad (4.18)$$

La stabilité de la commande par mode glissant est prouvée par la dérivée de la fonction définie positive de Lyapunov :

$$V_L = \frac{1}{2} S^2 \quad (4.19)$$

La dérivée de  $V_L$  doit être négative :  $S\dot{S} < 0$

$$S\dot{S} = S(\ddot{e} + K\dot{e}) \quad (4.20)$$

La substitution de (4.14) et (4.15) dans (4.20) donne :

$$S\dot{S} = S(\dot{x}_2 - \ddot{\omega}_{topt} + Kx_2 - K\dot{\omega}_{topt}) = S(f + g T_{em-SMC} - \ddot{\omega}_{topt} + Kx_2 - K\dot{\omega}_{topt}) \quad (4.21)$$

Substituant la loi de commande (4.18) en (4.21), on obtient :

$$S\dot{S} = S(-L \text{sing}(S)) = -L|S| \quad (4.22)$$

Finalement  $\dot{V}_L$  est négative. Alors, l'application de  $T_{em-SMC}$  force le système à converger en temps fini vers  $\omega_{topt}$ .

La figure 4.3 illustre le comportement du système éolien avec le changement de la vitesse du vent lorsque la CMG est appliquée. Si le système opère d'une manière optimale au point A à l'instant  $t_1$ , et la vitesse est changée à l'instant  $t_2$ , la stratégie de commande identifie l'erreur de poursuite et puis elle établit le couple électromagnétique (eq. 4.18). Cela implique le calcul des fonctions  $f$

et  $g$  qui demande de nouvelles grandeurs mesurées sur  $\omega_g, \omega_t, T_a, T_{em}$  et la détermination de leurs différentes dérivées. La commande répète toujours la même action jusqu'à ce que la variable d'état atteigne le point B. La CMG comporte deux composante ; la commande par commutation mène le système à la surface de glissement tandis que la commande équivalente garde le fonctionnement du système sur cette surface. Parmi les inconvénients majeurs de la CMG est la composante discontinue qui demeure activée. La réduction d'une telle composante (eq. 3.17) via leur gain de commutation provoque une insuffisance en terme de performance de poursuite. Par ailleurs, l'augmentation de cette composante est toujours accompagnée par des haute fréquences dit de réticence qui pourra causer l'instabilité dans certains cas.

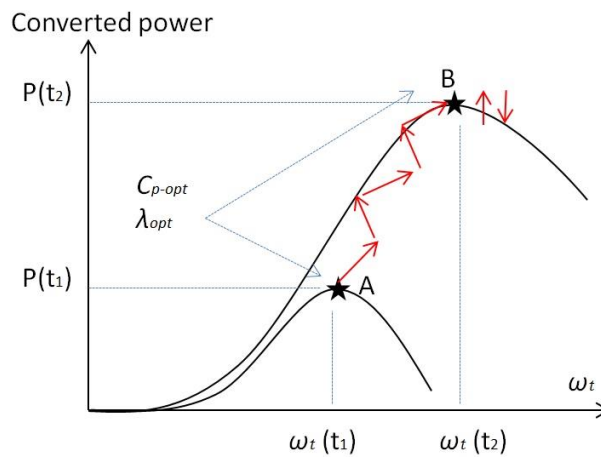


Figure 4.3 : Les dynamiques d'un système éolien commandé par la méthode du mode glissant.

Ces différents motifs nous ont menés à penser différemment dans une nouvelle stratégie de commande des systèmes éoliens. La sous section suivante est dédiée à cette raison ; la commande par une méthode d'intelligence artificielle est introduite.

## 2.3. Commande par SVM

### 2.3.1. Modélisation du couple électromagnétique par la méthode de SVM

Afin de trouver un séparateur optimal passant à travers un ensemble d'échantillons, la théorie SVM trace l'ensemble de données d'entrée dans un espace de dimension plus élevée (plus grande que la dimension des échantillons). A cette dimension, la création d'un séparateur linéaire devient possible. La reproduction de la solution en dimension naturelle est tirée par la fonction du noyau qui est choisie en fonction du problème concerné. Dans cette étude, deux fonctions du noyau seront testées pour choisir celle qui convient le plus pour le contrôle du système éolien. L'objectif de cette sous-section est de concevoir une méthode d'apprentissage, capable de modéliser la relation entre la vitesse du vent et le couple électromagnétique (commande de la partie mécanique) dépassant toutes les composantes et les complexités du système de puissance. Dans un premier temps, un ensemble de paires de données contenant la vitesse du vent et le couple

électromagnétique optimal correspondant sont établis. Grâce à ces données recueillies, un modèle SVM hors ligne est conçu, il servira à générer la valeur du couple optimal pour chaque nouvelle vitesse de vent donnée [dah-18].

Supposant qu'on dispose d'un ensemble d'exemples d'apprentissages  $(X_i, Y_i)$ , où les  $X_i$  représentent les vitesses du vent et les  $Y_i$  les couples électromagnétiques. La représentation dans l'espace caractéristique des SVM est donnée comme suit :

$$Y(X) = w^T \varphi(X) + b \quad (4.23)$$

Où  $w$  est un vecteur de dimension augmentée dans l'espace caractéristique des SVM,  $\varphi$  est une fonction qui trace les valeurs d'entrée (vitesses de vent) en espace caractéristique et  $b$  est un biais des SVM. Le problème d'estimation est formulé selon la minimisation :

$$\min_{w,e} Q(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (4.24)$$

Soumise aux contraintes suivantes :

$$Y_i(X_i) = w^T \varphi(X_i) + b + e_i \quad (4.25)$$

Où  $C$  est un facteur des SVM,  $e_i$  est l'erreur de régression et  $n$  est le nombre des échantillons. Suivant la théorie des SVM, la fonction de Lagrange est construite pour résoudre cette minimisation au contraintes, de la façon suivante :

$$\mathcal{L}(w, b, e, \alpha) = Q(w, e) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{w^T \varphi(X_i) + b + e_i - Y_i\} \quad (4.26)$$

Où les  $\alpha_i$  sont des multiplicateurs de Lagrange. Les dérivées partielles de la fonction de Lagrange par rapport aux  $w, b, e, et \alpha$  donnent respectivement :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi(X_i) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = C e_i \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow w^T \varphi(X_i) + b + e_i - Y_i = 0 \end{cases} \quad (4.27)$$

A partir de (4.27) l'équation matricielle linéaire peut être obtenue comme suit :

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1}_n^T \\ \mathbf{1}_n & \Omega + C^{-1} \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Où  $Y = [Y_1, \dots, Y_n]^T$ ,  $\mathbf{1}_n = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$ ,  $\mathbf{1}_n$  est une matrice identité  $n \times n$ , et  $\Omega \in \mathbb{R}^{n \times n}$  est une matrice de noyau, définie par  $\Omega_{ij} = \varphi(X_i)^T \times \varphi(X_j) = K(X_i, X_j)$ .

Dans cette régression non linéaire, deux noyaux vont être testés ; Le noyau polynomial  $K(X_i, X_j) = (\|X_i - X_j\| + ct)^d$  et gaussien  $K(X_i, X_j) = \exp(-\|X_i - X_j\|^2 / \sigma^2)$  qui est largement connue sous le nom 'fonction de base radiale' (radial basis function ou RBF).

le paramètre  $\sigma$  est une constante positive du noyau qui règle la flexibilité du séparateur. Dans la solution polynomiale, la séparation est un polynôme d'ordre  $d$  où les échantillons sont des composantes polynomiales.  $ct$  est la constante qui détermine le poids des composantes d'ordre supérieur dans le polynôme. Le poids change proportionnellement à  $ct$ .

A partir de (4.23), (4.27) et (4.28), la valeur de la sortie (la valeur estimée du couple électromagnétique) est calculée de la façon suivante :

$$\hat{Y}(X^*) = \sum_{i=1}^n \alpha_i k(X^*, X_i) + b \quad (4.29)$$

Avec  $X^*$  est une nouvelle valeur de la vitesse du vent et  $\hat{Y}$  est la valeur estimée du couple.

Les figures (4.4) représentent l'estimation par SVM en utilisant un noyau polynomial et un noyau RBF. On remarque que l'estimation par la méthode SVM basée sur le noyau polynomial est plus précise que celle basée sur le noyau RBF en terme d'estimation du couple électromagnétique optimal. Pour vérifier le niveau de finesse de l'estimation par SVM, basée sur les fonctions noyaux RBF et polynomiales, on utilise le métrique RMSE (Root Mean Square Error) de la façon suivante [Sha-15]:

$$\begin{cases} RMSE(\hat{T}_{em\_RBF}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{T}_{em\_RBF_i} - T_{em_i})^2 / N} \\ RMSE(\hat{T}_{em\_poly}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{T}_{em\_poly_i} - T_{em_i})^2 / N} \end{cases} \quad (4.30)$$

Le terme  $N$  est le nombre d'échantillons testés.  $T_{em_i}$ ,  $\hat{T}_{em\_RBF_i}$  et  $\hat{T}_{em\_poly_i}$  sont respectivement la  $i^{th}$  référence du couple électromagnétique, l'estimation par SVM basée sur le noyau RBF et l'estimation par SVM basée sur le noyau polynomial.

Lorsqu'on considère toute la plage des couples et  $N=300$ , on trouve les valeurs numériques du métrique RMSE suivantes :

$$\begin{cases} RMSE(\hat{T}_{em\_RBF}) = 435.1469 \\ RMSE(\hat{T}_{em\_poly}) = 27.3942 \end{cases}$$

A partir de cette donnée, le SVM polynomial sera utilisé pour identifier la variable de commande du couple dans le reste de ce travail.

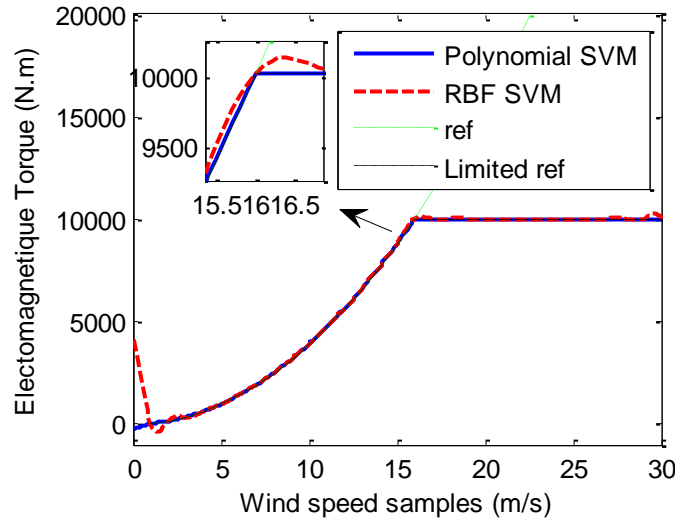


Figure 4.4 : estimation du couple électromagnétique du GADA par la méthode SVM

### 2.3.2. Modélisation de l'angle de calage par la méthode de SVM

Le rôle de la commande de l'angle de calage apparaît lorsque le vent devient fort. Cette commande doit libérer l'excès de l'énergie aérodynamique interceptée par le rotor. L'angle de calage  $\beta$  sera modélisé en fonction de la vitesse du vent. De même que pour le couple électromagnétique (la sous-section ci-dessus), à chaque échantillon du vent, l'angle de calage correspondant est introduit. Finalement, l'égalité matricielle obtenue est de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_n^T \\ 1_n & \Omega + C^{-1}I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_\beta \\ \alpha_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

les termes  $\alpha_\beta$ ,  $b_\beta$  et  $\beta$  correspondent respectivement aux multiplicateurs de Lagrange du contrôleur de l'angle de calage, biais de régression et aux échantillons des angles de calage. La relation qui restitue l'estimation de l'angle de calage optimal est finalement obtenue comme:

$$\hat{\beta}(X^*) = \sum_{i=1}^n \alpha_{\beta i} k(X^*, X_i) + b_\beta \quad (4.32)$$

Dans cette sous-section, les deux fonctions du noyau sont testées (RBF et polynomiale), et la fonction polynomiale est la meilleure en terme de précision (figure 4.5). Le RMSE est appliqué pour la validation de ce choix :

$$\left\{ \begin{array}{l} RMSE(\hat{\beta}_{RBF}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{\beta}_{RBF_i} - \beta_i)^2 / N} \\ RMSE(\hat{\beta}_{poly}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{\beta}_{poly_i} - \beta_i)^2 / N} \end{array} \right. \quad (4.33)$$

Les termes  $\beta_i$  ,  $\hat{\beta}_{RBF_i}$  ,  $\hat{\beta}_{poly_i}$  sont respectivement la  $i^{ème}$  référence de l'angle de calage, l'estimation par SVM basée sur le noyau RBF et l'estimation par SVM basée sur le noyau polynomial. Lorsque toute la plage des angles de calage sont inclus et N=30, le métrique RMSE vaut :

$$\left\{ \begin{array}{l} RMSE(\hat{\beta}_{RBF}) = 0.4274 \\ RMSE(\hat{\beta}_{poly}) = 1.664 \cdot 10^{-4} \end{array} \right.$$

Par conséquent, le SVM basé sur la fonction du noyau polynomial sera utilisé pour identifier la variable de commande (l'angle de calage) dans le reste du travail. Sur la figure 4.6, le schéma final d'estimation par SVM des variables de commande  $T_{em}$  et  $\beta$  est illustré. Table 4.1, contient les paramètres des contrôleurs SVM à base des noyaux BRF et polynomiaux.

**Tableau 4.1: Paramètres du contrôleurs SVM à base des noyaux RBF et polynomial.**

Multiplicateurs de Lagrange pour l'identification du couple électromagnétique		Multiplicateurs de Lagrange pour l'identification de l'angle de calage	
SVM Polynomial	SVM RBF ( $\times 10^2$ )	SVM polynomial ( $\times 10^{-3}$ )	SVM RBF ( $\times 10^7$ )
-23.6253	-53.8077	-93.8990	-1.4166
9.8672	-30.1932	0.0000	6.9213
9.8672	-37.7132	-0.0000	-10.9499
9.8672	-33.0050	0.0000	0.9198
9.8672	-32.1945	-0.0000	12.0688
9.8672	-29.3403	0.0000	-0.5693
9.8672	-26.6297	-0.0000	-14.8260
9.8672	-23.2549	0.0000	-4.4792
9.8672	-19.5213	0.0000	17.1327
9.8672	-15.2940	-0.0000	14.6377
9.8672	-10.6844	0.0000	-15.5373

9.8672	-5.4836	-0.0000	-30.5647
9.8672	-0.2246	0.0000	5.2294
9.8672	6.5282	0.0000	56.7470
9.8672	10.8836	-0.0000	25.0934
-152.3858	23.2874	778.1250	-167.6193
0.0000	17.9151	-456.5373	124.4130
-0.0000	19.9325	-75.6950	27.5889
-0.0000	19.1881	-21.4151	-43.7749
-0.0000	19.4626	-18.2564	-26.9292
-0.0000	19.3603	-15.8019	16.4837
0.0000	19.4015	-13.8362	23.9265
0.0000	19.3767	-12.2350	-3.1040
-0.0000	19.4119	-10.9065	-18.8590
0.0000	19.3279	-9.7882	-2.5945
-0.0000	19.5520	-8.8371	14.8255
-0.0000	18.9446	-8.0172	2.4720
0.0000	20.5945	-7.3060	-13.9114
-0.0000	16.1209	-6.6844	8.3264
37.8707	28.0587	-18.9096	-1.6507

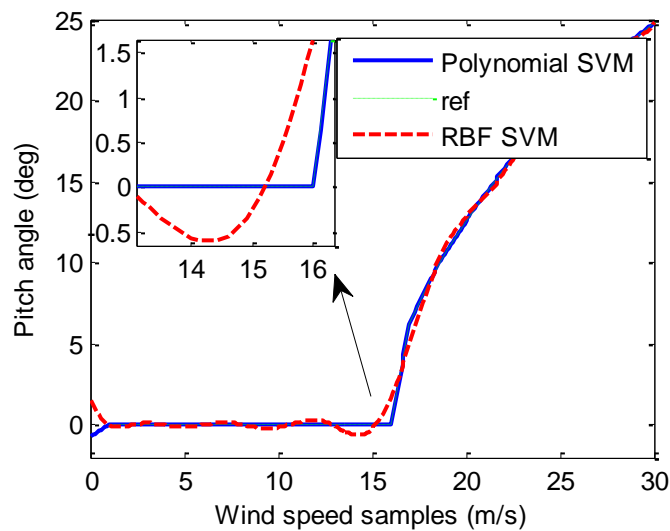


Figure 4.5 : l'estimation de l'angle de calage des pales de l'éolienne par SVM

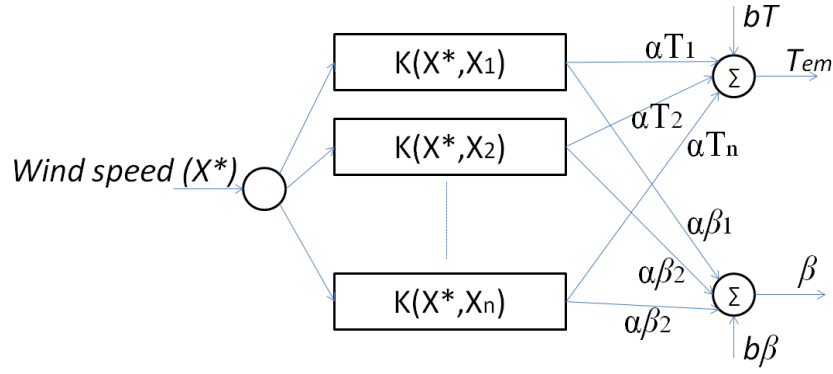


Figure 4.6 : structure du contrôleur SVM proposé pour une éolienne.

### 2.3.3. Stratégie de commande par SVM

Pour appliquer la stratégie de commande proposée, les données composées par les combinaisons des vitesses du vent et leurs couples optimaux doivent d'abord être fournis. Pour cette raison, les équations du système éolien (4.5) et (4.6) sont considérées. Dans les conditions de fonctionnement optimal du système éolien, les dérivées de la vitesse du rotor et de la vitesse du générateur sont nulles. Par conséquent, les équations (4.5) et (4.6) seront réécrites respectivement comme suit [dah-18]):

$$T_a - T_{ls} - K_r \omega_t = 0 \quad (4.34)$$

$$T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em} = 0 \quad (4.35)$$

Substituer l'équation (4.34) dans l'équation (4.35), sachant que  $T_{hs} = T_{ls}/n_g$ ,  $\omega_t = \omega_g/n_g$  et  $\omega_t = V \cdot \lambda/R$ , on obtient:

$$T_{em} = (T_a - K_r V \cdot \lambda/R)/n_g - K_g n_g V \cdot \lambda/R \quad (4.36)$$

Le couple électromagnétique est exprimé maintenant en (4.36) en fonction de la vitesse du vent (couple=f(V)). Afin de fournir les échantillons de données d'apprentissage (valeurs optimales) pour la modélisation SVM, on remplace la valeur de la vitesse du vent dans (4.36) et on tire la valeur du couple électromagnétique correspondante (tableau 4.2).

Pour fournir théoriquement les échantillons de l'angle de calage, on procède comme suit: on trouve la puissance maximale convertie au passage de la zone II à la zone III avec :

La vitesse du vent qui coïncide à la transition de la zone II à la zone III :

$$V_{trans} = 16 \text{ m/s} \quad (4.37)$$

Le facteur de puissance optimal :

$$C_{p-optimal} = 0.43 \quad (4.38)$$

La limite de la puissance générée :

$$P_{limit} = 0.5 \times \rho \times A \times C_{p-optimal} \times V_{trans}^3 \quad (4.39)$$

Lorsque le vent est fort (plus de 16 m / s), on veut convertir seulement une quantité de puissance égale à  $P_{limit}$ . Donc, un coefficient de puissance pour le vent fort  $C_{p-str}$  est établi sous la forme suivante:

$$C_{p-str} = C_{p-optimal} \times (V_{trans}/V_{str})^3 \quad (4.40)$$

Avec  $V_{str}$  représente les vitesses du vent fort.

Le coefficient de puissance est donné par [Bou-15] sous la forme suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2/\lambda_i - c_3\beta - c_4)\exp(-c_5/\lambda_i) + c_6\lambda \quad (4.41)$$

Où  $1/\lambda_i = \frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}$

Les valeurs de  $\lambda_{str}$  sont trouvés à partir de l'équation (4.4) sous la forme :

$$\lambda_{str} = \frac{\omega_{limit} \times R}{V_{str}} \quad (4.42)$$

Où  $\omega_{limit}$  est la limite de la vitesse angulaire autorisée par le constructeur de la turbine.

Sachant maintenant la valeur de  $C_{p-str}$  et de  $\lambda_{str}$ , la connaissance de  $\beta$  devient possible. Le tableau (4.2) contient les échantillons des vitesses et les valeurs des angles de calage et les couples électromagnétiques optimaux.

**Table 4.2: les exemples d'apprentissage du modèle SVM:**

Vitesse du vent (m/s)	Couple électromagnétique ( $\times 10^3$ N.m)	Angle de calage (deg°)
1	0.3503	0
2	1.4899	0
3	3.4189	0
4	6.1373	0
5	9.6450	0
6	13.9421	0
7	19.0286	0
8	24.9045	0

9	31.5698	0
10	39.0244	0
11	47.2684	0
12	56.3018	0
13	66.1245	0
14	76.7366	0
15	88.1381	0
16	100.3290	0
17	100.3290	6.225000
18	100.3290	8.797702
19	100.3290	10.764844
20	100.3290	12.560665
21	100.3290	14.210435
22	100.3290	15.733790
23	100.3290	17.146455
24	100.3290	18.461240
25	100.3290	19.688773
26	100.3290	20.838000
27	100.3290	21.916530
28	100.3290	22.930922
29	100.3290	23.886866
30	100.3290	24.789335

En pratique, une formulation de problème qui permet d'obtenir une relation directe entre la vitesse du vent et la variable de commande n'est pas toujours une tâche facile. Le modèle du système éolien est considéré inconnu, et le défi est de concevoir une méthode qui conduit le système d'une manière optimale tant que possible. Pour collecter pratiquement les exemples d'apprentissage, on règle manuellement le couple électromagnétique et l'angle de calage pour avoir les valeurs optimales qui correspondent à chaque vitesse du vent.

Les étapes suivantes sont nécessaires pour l'application de la commande SVM [dah-18]):

- Echantillonner l'intervalle des valeurs du vent.
- Pour chaque vitesse du vent, identifier manuellement le couple optimal et l'angle de calage optimal.

- Construire un modèle SVM hors ligne qui accepte la vitesse comme entrée et retourne le couple et l'angle.

La figure (4.7) illustre comment fonctionne le système avec le changement du vent lorsque la stratégie de commande est appliquée. A l'instant  $t_1$ , on suppose que le système fonctionne dans des conditions optimales au point A, et on suppose que la vitesse du vent change à l'instant  $t_2$ ; la stratégie de commande capte la vitesse du vent et applique le couple et l'angle optimaux. Cette action passe instantanément, parce qu'il demande seulement l'intervention du capteur de la vitesse du vent (gyromètre). Par conséquent, la turbine éolienne rejoint rapidement la vitesse angulaire optimale, et aussi le système entier rejoint son fonctionnement optimal. Ce contrôleur manipule aussi les scenarios des vents forts en limitant le facteur de puissance et aussi la vitesse angulaire de la turbine et du générateur. Figure (4.8) présente l'organigramme des différentes étapes de la conception et l'exploitation du contrôleur SVM.

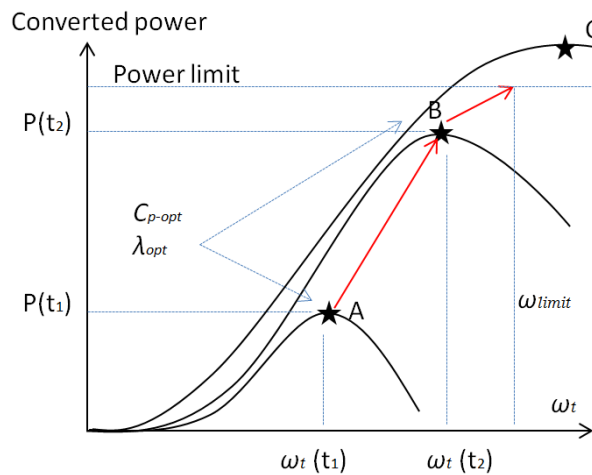


Figure 4.7 : les dynamiques du système éolien lors de l'application du contrôleur SVM.

### 3. Testes, simulations et discussion

Dans ce travail, les deux stratégies de commandes sont appliquées sur le même système éolien. Le but, c'est de comparer les performances de SVM par rapport à la méthode SMC. Cette dernière est largement connue dans les domaines de recherche, notamment la commande de l'énergie éolienne [Yin-15]. Celle-ci est synthétisée à partir de l'état du système et les mesures sur différentes grandeurs. La stratégie de commande par SVM fonctionne différemment. Elle est conçue indépendamment aux dynamiques et aux complexités du système. Cela, rend l'implémentation de SVM simple, puisqu'elle demande seulement un gyromètre (capteur de la vitesse de vent) et un simple dispositif numérique dans lequel l'algorithme de commande sera chargé.

### 3.1. Test au vent normal théorique

Pour valider la commande proposée, on va appliquer soudainement des changements en vent (figure 4.9). Au début, la vitesse du vent diminue soudainement après 250 secondes de 9m/s à 7m/s et à 11m/s après 500 secondes. Après des durées de 150 secondes, la vitesse diminue à 10 m/s et augment à 12 m/s. Dans la majorité des figures de simulations, les deux stratégies sont présentées dans la même fenêtre, ce qui permet d'une bonne comparaison. La ligne bleu indique la courbe de la commande SVM, la ligne rouge intermittente indique la courbe de la commande SMC et la ligne verte pointillée indique la courbe de la référence théorique [dah-18)].

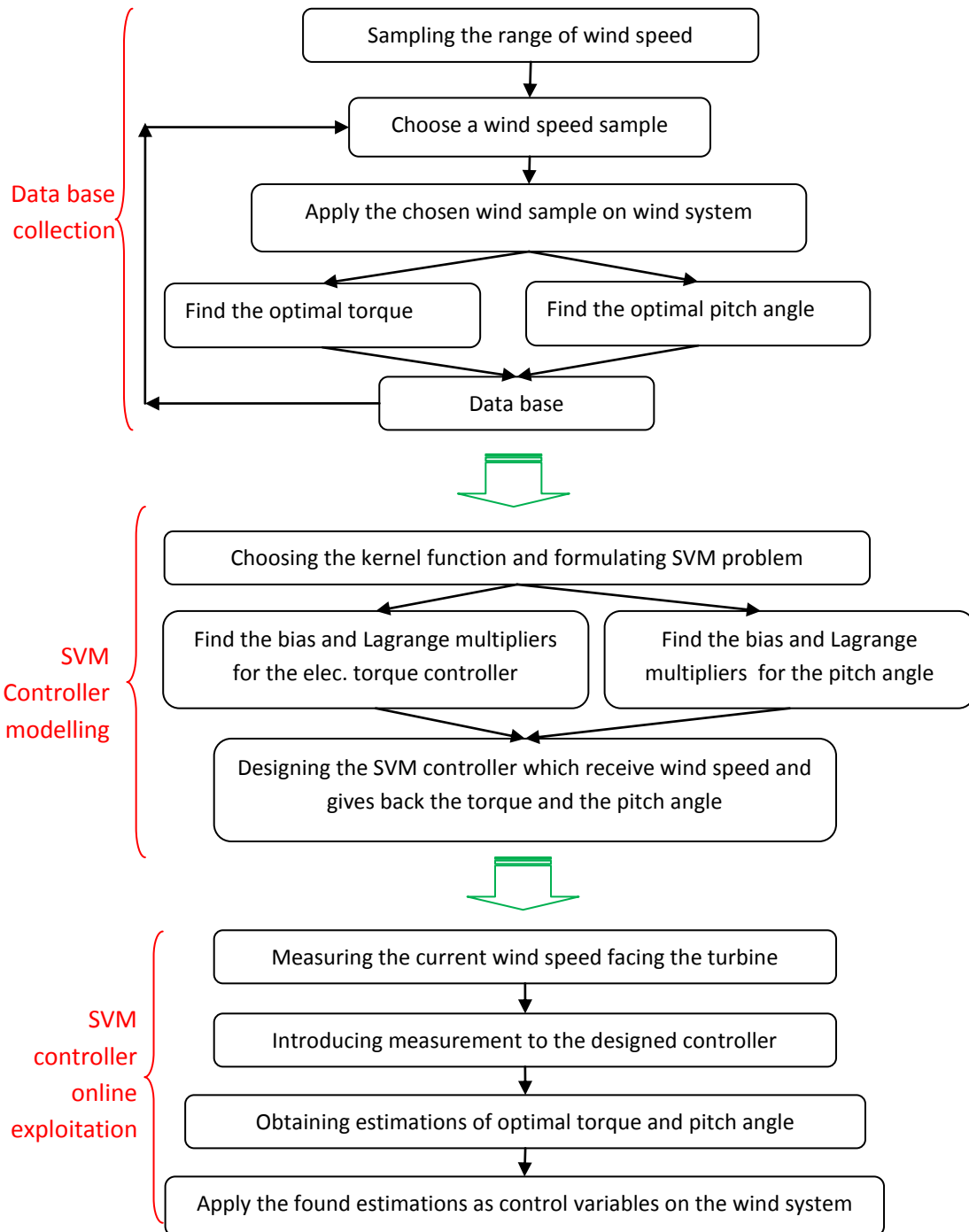


Figure 4.8 : organigramme du processus de conception et d'application du contrôleur SVM

Dans ce cas de simulation, la commande SMC est simulée avec une moyenne d' amplitude de gain de commutation égale à 0,03. Le mauvais effet du gain de commutation apparaît clairement dans cette commande (SMC). La variable de commande  $T_{em}$  alterne violemment entre  $4.10^3 N.m$  et  $2.3 10^3 N.m$  à l'état stationnaire (Figure 4.10) à cause de la partie de commutation dans la commande SMC (une amplitude de couple d'un peu prêt de  $1.7 10^3 N.m$  ). Ces alternances hautes fréquences provoquent un phénomène indésirable dit de réticence. Revenant à notre méthode SVM, la variable de commande  $T_{em}$  se comporte parfaitement. Lorsque la vitesse du vent change, la variable de commande se déplace correctement, vite et sans alternance à la valeur optimale.

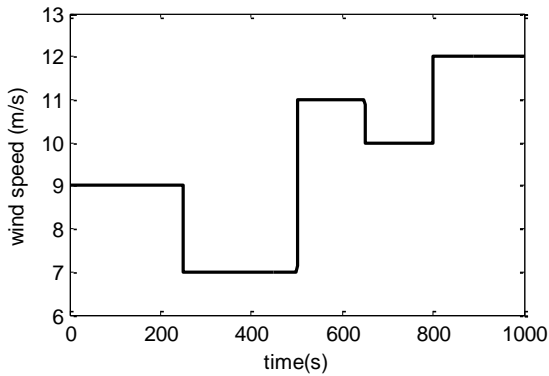


Figure 4.9 : Profile théorique du changement de la vitesse du vent.

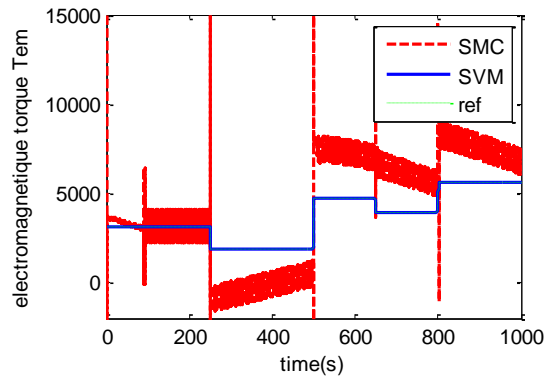


Figure 4.10 : commande en couple électromagnétique

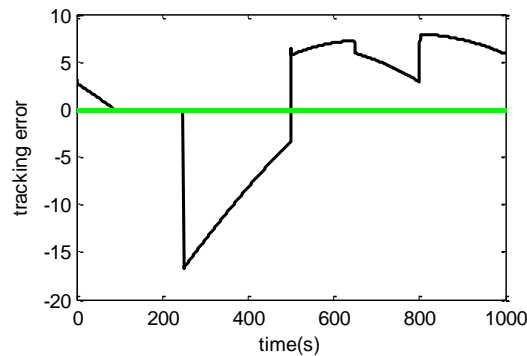


Figure 4.11 : l'erreur de poursuite du mode glissant

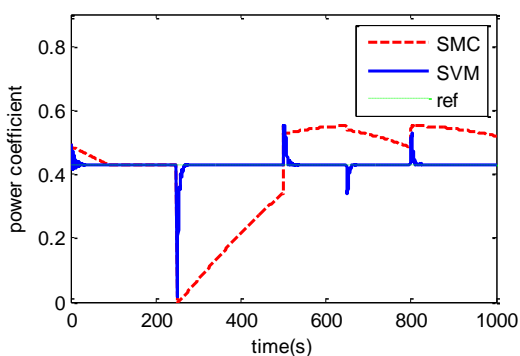


Figure 4.12 : le coefficient de puissance

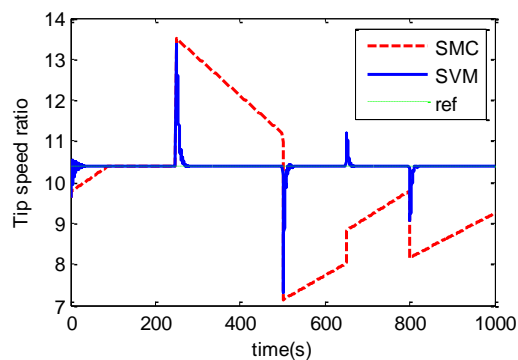


Figure 4.13 : la vitesse spécifique

La commande SMC n'arrive pas à atteindre l'optimalité quand les changement de la vitesse de vent sont rapides. Comme il est montré dans la figure 4.11, l'erreur n'arrive pas à converger vers zéro. Dans les figures 4.12 et 4.13, la commande SVM force le coefficient de puissance  $C_p$  et la vitesse spécifique  $\lambda$  à rester optimal. Ces deux grandeurs clé se comportent mieux que SMC en terme de taux de convergence et de la stabilité du système.

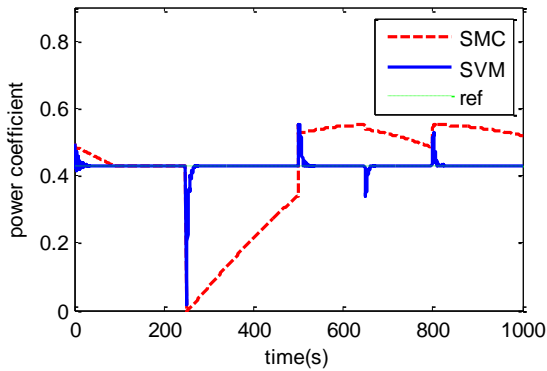


Figure 4.12 : le coefficient de puissance

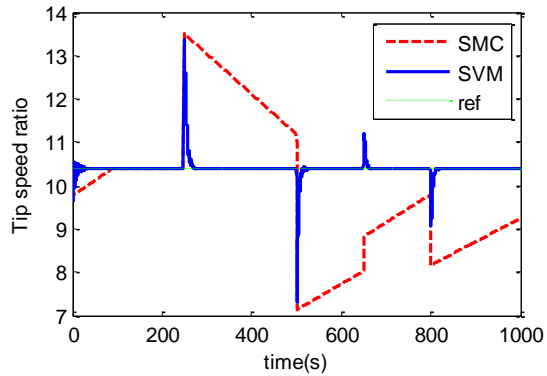


Figure 4.13 : la vitesse spécifique de l'éolienne

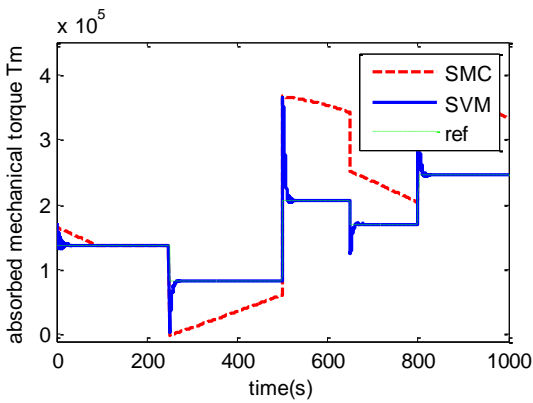


Figure 4.14 : le couple aérodynamique

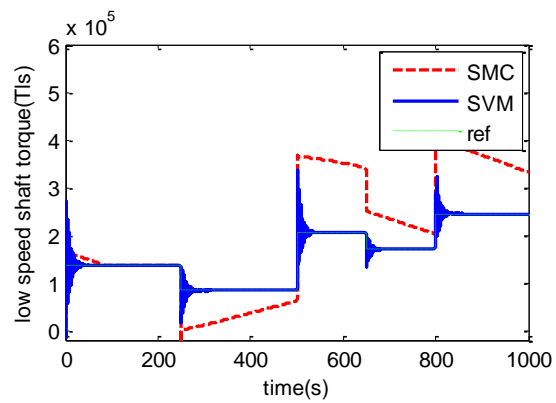


Figure 4.15 : le couple de l'arbre à vitesse de rotation basse

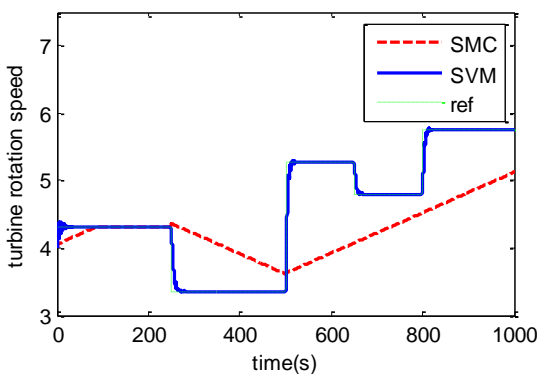


Figure 4.16 : vitesse de rotation de la turbine

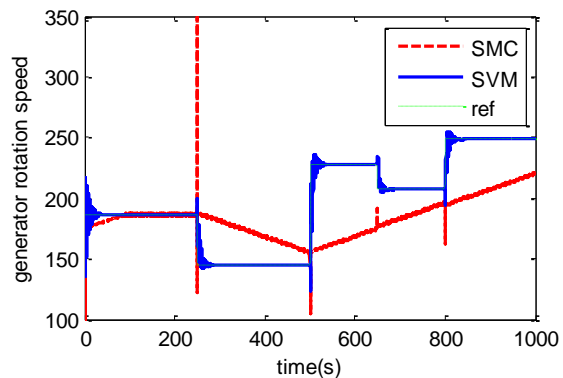


Figure 4.17 : vitesse de rotation du générateurs

Le couple aérodynamique, le couple de l'arbre à vitesse lente, la vitesse de rotation de la turbine et de la génératrice sont illustrées respectivement dans les figures 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17 . A partir de ces figures, la commande SVM est la meilleur en terme de fiabilité et d'efficacité dans le cas du vent normal aux changements brusques.

### 3.2. Test au vent fort théorique

Dans cette sous-section, un profile du vent fort est testé. Pour des périodes égaux de 100 secondes, le vent passe de 15 m/s à 16, 18, 20, 19 et 14m/s. Pour manipuler cette situation et mener à bien le système éolien dans ces conditions, où la puissance aérodynamique interceptée dépasse la puissance nominale que l'éolienne peut fournir, le couple électromagnétique ne doit pas dépasser les limites autorisées par le constructeur. Alors le couple aérodynamique sera aussi limité. Puisque la puissance convertie par l'éolienne n'est pas maximale, le coefficient de puissance est adapté pour chaque vitesse du vent. Les figures 4.18, 4.19, 4.20 et 4.21 montrent clairement le fonctionnement du système dans ces conditions. Le facteur de puissance (figure 4.22), dépend principalement de l'angle de calage  $\beta$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$ . Si on laisse  $\beta = 0$  et on ajuste seulement  $\lambda = \frac{\omega_t R}{V}$ , la vitesse de rotation de la turbine et du générateur va augmenter exponentiellement. La solution est de libérer l'excès de puissance en ajustant l'angle  $\beta$  (figure 4.23). La figure 4.24 montre que la vitesse de rotation demeure limitée dans ses valeurs autorisées.

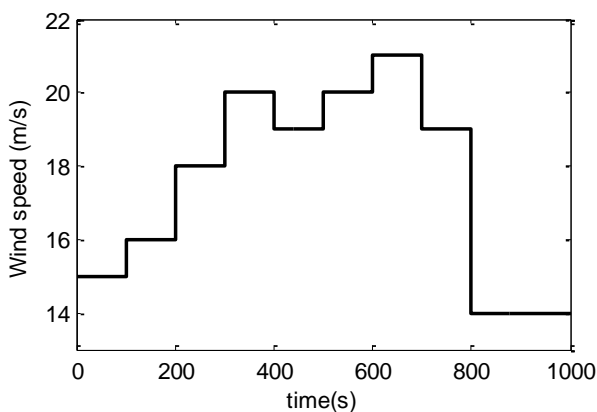


Figure 4.18 : profile du vent fort théorique

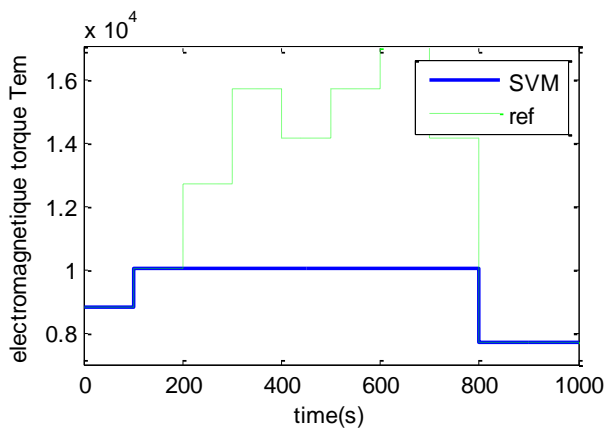


Figure 4.19 : le couple électromagnétique (couple résistant) ne dépasse pas la limite autorisée par le constructeur.

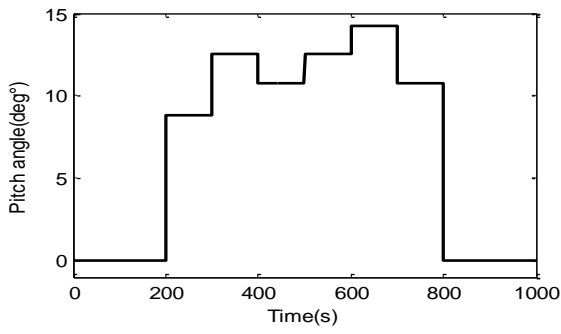


Figure 4.20 : l'angle de calage s'adapte à chaque variation du vent fort.

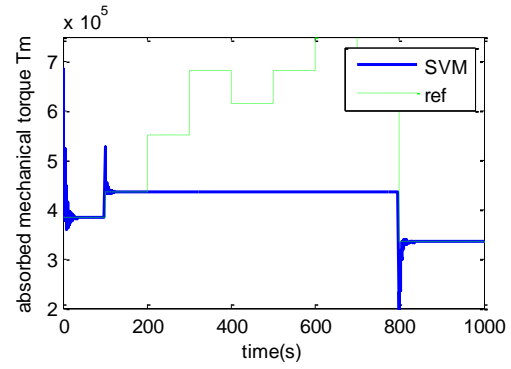


Figure 4.21 : couple mécanique au moments du vent fort

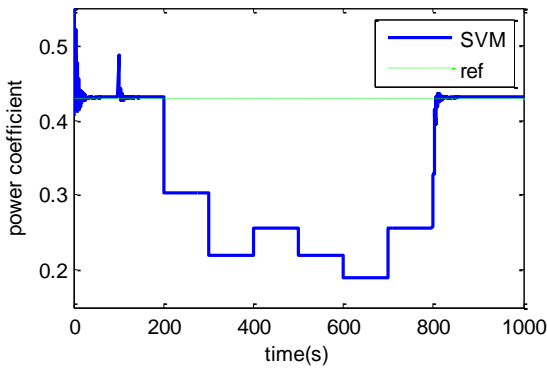


Figure 4.22 : le facteur de puissance est inversement proportionnel à l'ampleur de la puissance du vent fort

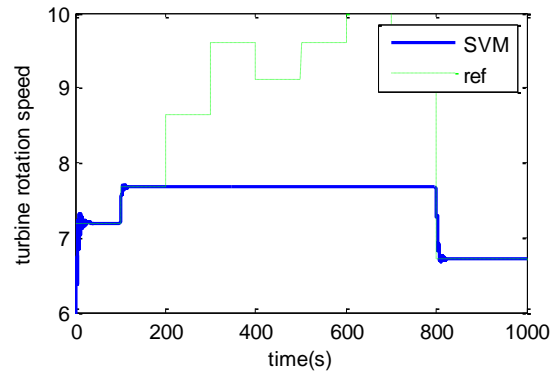


Figure 4.23 : la vitesse de la turbine éolienne demeure limitée dans le cas des vents forts.

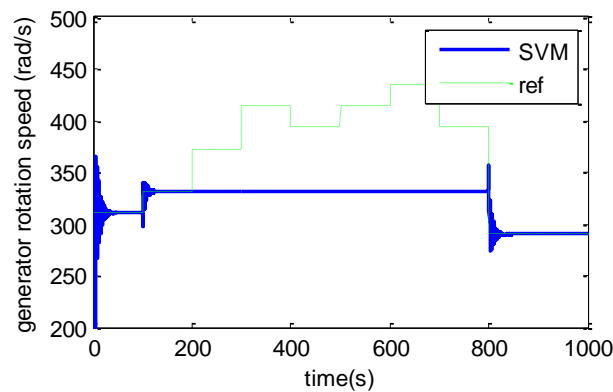
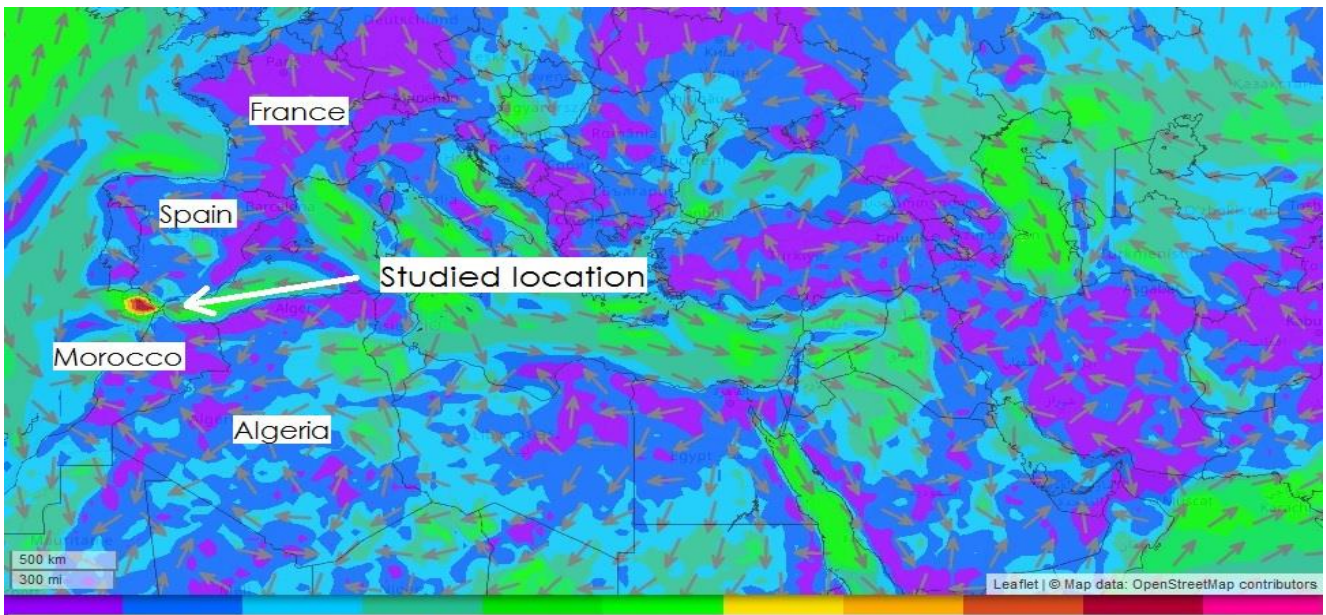


Figure 4.24 : la vitesse du générateur demeure limité dans les vents forts.

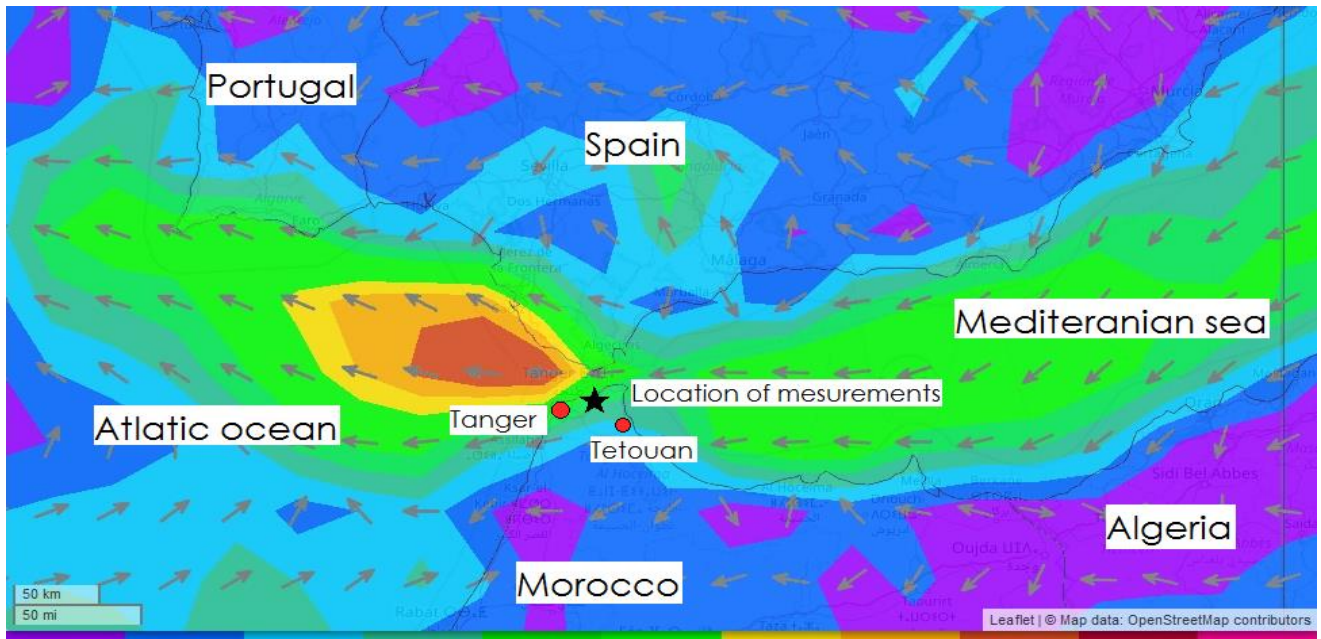
### 3.3. Test au vent réel

Pour évaluer pratiquement la fiabilité de l'approche proposée, les données météorologiques réelles sont mesurées localement dans des intervalles de temps égaux. Sur les périphéries du détroit de la mer méditerranéenne réside une richesse considérable de vent (figure 4.25 et figures 4.26). On considère le profile de vent d' un jours venteux dans la région de Tétouan, une ville au nord du Maroc très connue par sa richesse éolienne.

On a pris comme échantillon le 22 janvier ; jour venteux distingué parmi les 365 jours, bon profile pour la validation. Ce dernier combine des périodes de vents normaux et autres vents forts (figure 4.27). les variables de commandes ( $T_{em}$  et  $\beta$ ) sont montrées dans la figures 28 et 29. Lorsque le vent est en dessous de la vitesse limite, la commande en couple  $T_{em}$  poursuit la valeur optimal (MPPT) et  $\beta$  reste nulle. Autrement, l'angle  $\beta$  augmente pour poursuivre la limitation de la puissance et le couple  $T_{em}$  reste limité. A la figure 30, le coefficient de puissance reste pratiquement optimal (égale à 0.43) et diminue quand le vent est fort. La vitesse de rotation de la turbine et du générateur est aussi optimale et ne dépasse pas la limitation du constructeur (figures 31 et 32).



0 m/s 2 m/s 4 m/s 6 m/s 8 m/s 10 m/s 12 m/s 14 m/s 16 m/s 18 m/s 20 m/s  
 figure 4.25 : la distribution du vent dans le monde le 19 May 2017 à 13h.



0 m/s 2 m/s 4 m/s 6 m/s 8 m/s 10 m/s 12 m/s 14 m/s 16 m/s 18 m/s 20 m/s  
figure 2.26 : vitesse du vent dans le détroit atlantique/méditerranéen le 19 Mai 2017 à 13h.

En bref, l'application de la méthode SVM est convenable pour la commande des systèmes éoliens dans les conditions réelles.

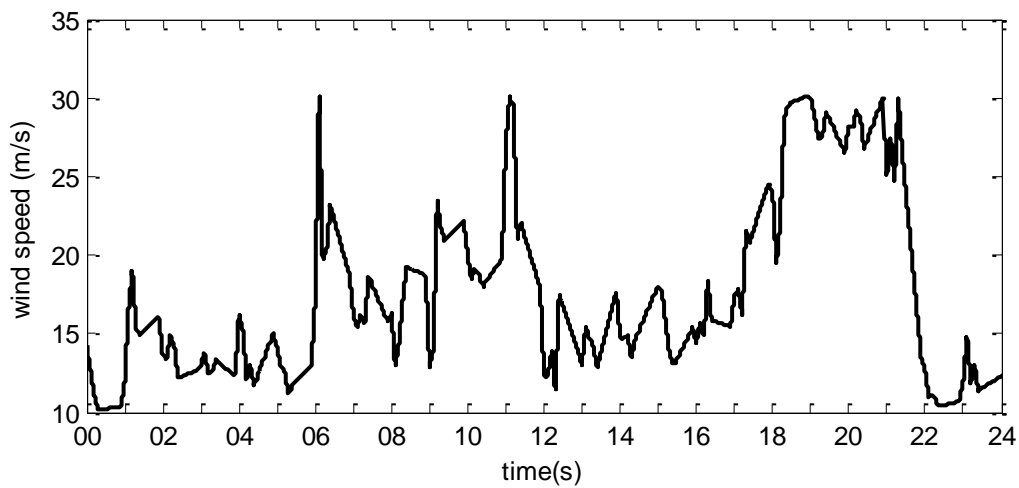


Figure 4.27 : profile du vent mesuré dans les régions de Tétouan

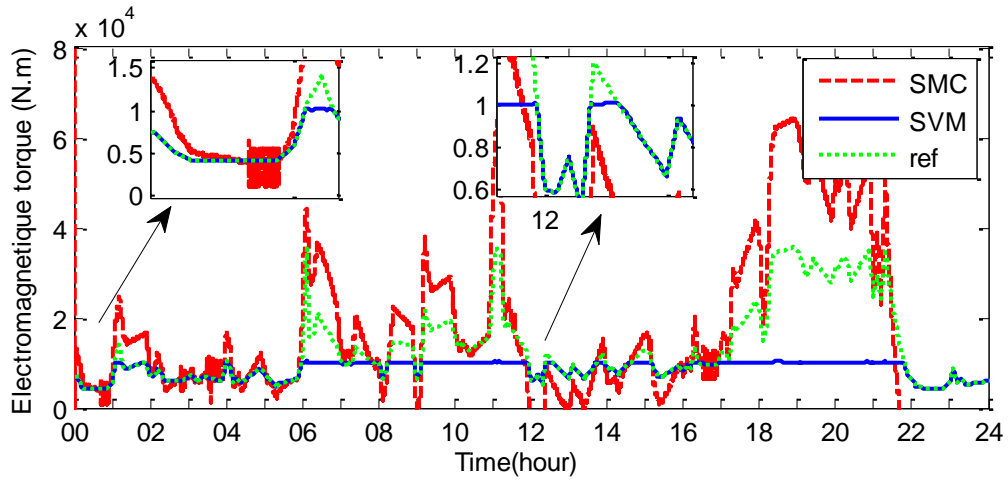


Figure 4.28 : couple électromagnétique pour un profil du vent réel

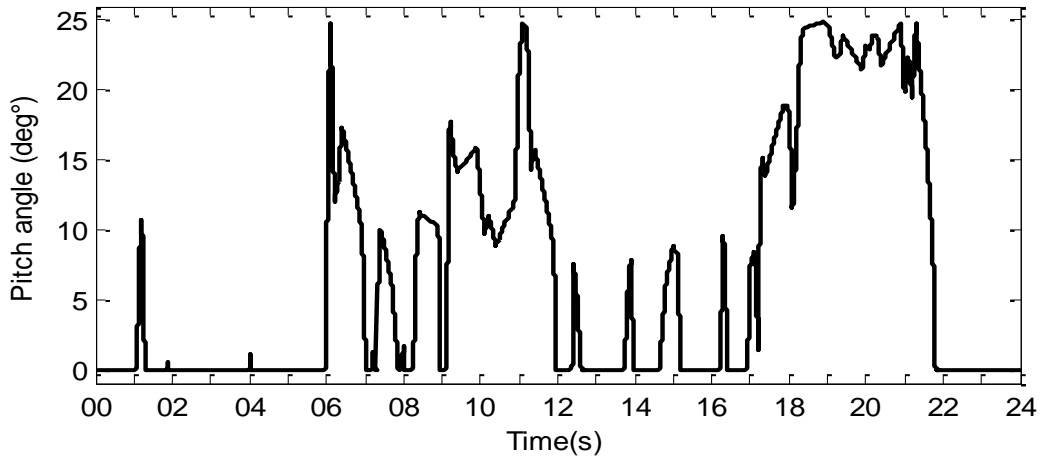


Figure 4.29 : l'angle de calage pour un profil de vent réel

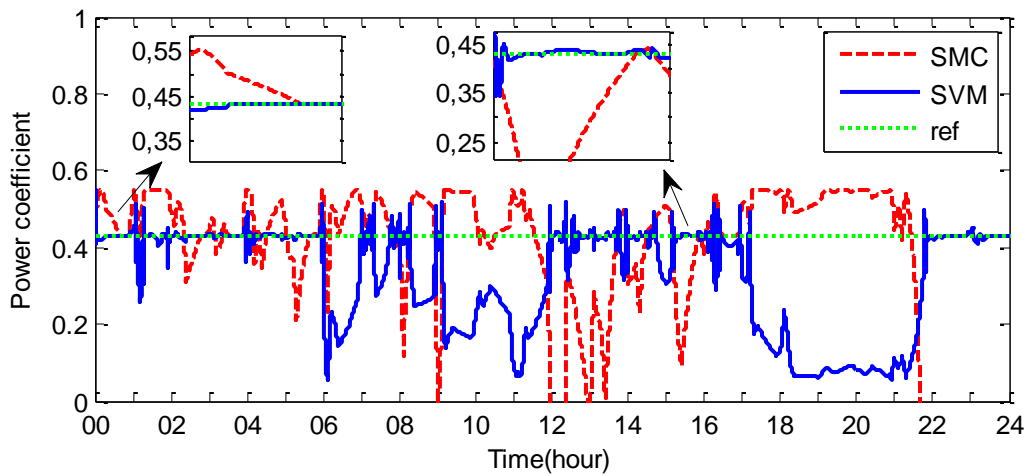


Figure 4.30 : le facteur de puissance au vent réel

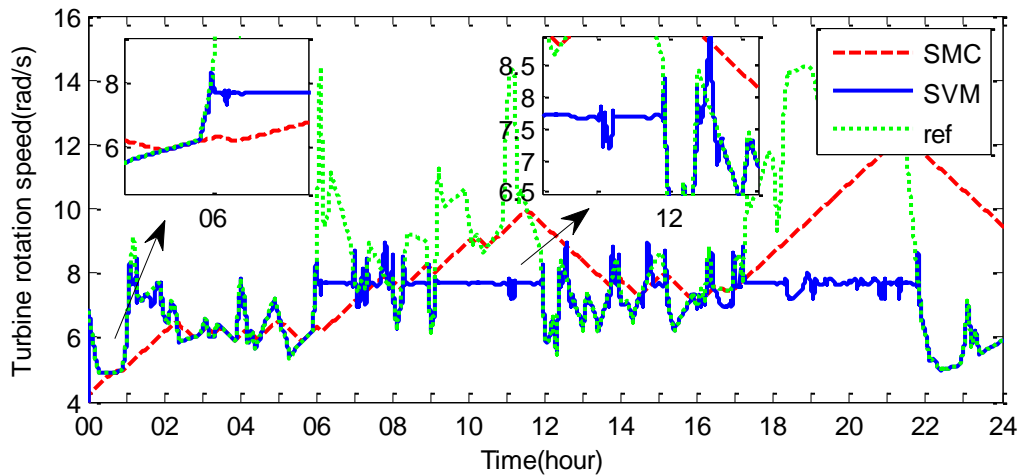


Figure 4.31 : la vitesse de rotation de la turbine testé sous le profile d'un vent réel

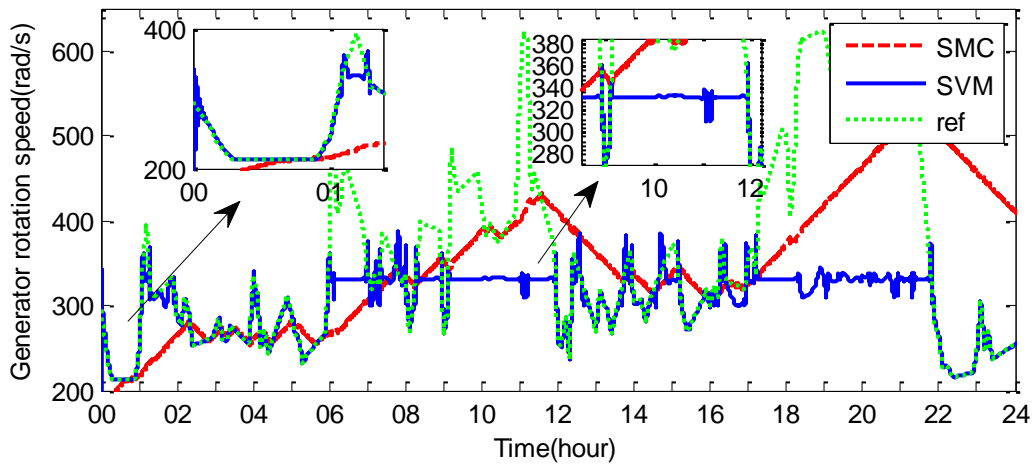


Figure 4.32 : la vitesse de rotation du générateur.

#### 4. Résultats d'application de la commande SVM sur les éoliennes

Une nouvelle stratégie de commande est proposée pour la production de l'énergie éolienne, dont le but est de faire fonctionner le système éolien d'une façon optimale quelque soit la vitesse et la variation du vent. Les données d'apprentissage sont collectées d'abord comme des couples comportant la vitesse du vent et son couple électromagnétique optimal ainsi que son angle de calage correspondant. Puis, un algorithme SVM est conçu. Il permet d'estimer le couple et l'angle optimaux pour chaque nouvelle vitesse du vent. Ainsi, un contrôleur SVM peut opérer le système éolien d'une manière optimale juste en connaissant la vitesse du vent. Finalement, le système éolien est modélisé avec l'environnement SIMULINK et commandé par la méthode SVM pour montrer l'efficacité de cette stratégie sur les systèmes éoliens.

Les critères suivants montrent pourquoi le SVM peut être une technique plus fiable de commande pour l'énergie éolienne:

- Les performances avancées à l'extraction de la puissance maximale en poursuivant la référence optimale quand la vitesse du vent est moyenne (vitesse en dessous de la vitesse limite autorisée par le constructeur).
- Le coût économique réduit grâce au nombre limité des capteurs demandés.

Durabilité satisfaisante des matériels électromécaniques de l'éolienne, grâce au manque de vibrations à la commande appliquée.

## 5. Commande d'une hydrolienne

Comme on a beaucoup de similitudes entre l'énergie éolienne et l'énergie extraite par les systèmes adaptés à la marée, ce travail va mettre uniquement en évidence les différences entre ces deux énergies en terme d'extraction.

Faire face au manque d'énergie propre et aux ressources fossiles limitées, la tendance vers l'énergie renouvelable devient extrême. En plus de l'énergie solaire et éolienne, l'énergie de la marée est intégrée récemment dans le système des énergies renouvelables [Ben-07, Ben-10, Uih-16, Ozk-17]. Elle est créée par la nature astronomique interactionnelle du système solaire. Ainsi, cette énergie est hautement prédictible, durable et peut contribuer sérieusement à l'approvisionnement de l'énergie au futur. Il est estimé que 3.5 TW de l'énergie de la marée est dissipée partout dans le monde, environ 130% de la demande énergétique mondiale.

Malgré le progrès connu dans le domaine des énergies renouvelables, l'utilisation de l'énergie de la marée demeure très limitée. Elle présente actuellement moins de 0.4% l'énergie durable produite. Pour donner plus de crédibilité à cette énergie, beaucoup de thèmes de recherche se basent principalement sur l'aspect économique et topologique. Dans ce présent travail, on s'intéresse au côté technique et précisément la commande intelligente.

Dans cette section, la commande par SVM est étendue sur les systèmes hydroliens. Le principe de fonctionnement de ce dernier est généralement similaire à une éolienne. Ce qui change c'est le matériel sous-marin utilisé et la conception du rotor de l'hydrolienne.

La commande par SVM destinée à l'hydrolienne ne changera pas beaucoup par rapport à celle de l'éolienne. La commande de l'angle de calage ne sera pas prise en compte. Ce choix est pris vu la nature de la marée qui a un comportement presque prédictible et les vitesses d'écoulement d'eau sont toujours bornées.

La commande par SVM va couvrir seulement le couple électromagnétique du générateur de l'hydrolienne. Ainsi, à chaque vitesse du courant marin, un couple électromagnétique optimal qui correspond à cette vitesse est identifié manuellement. Ces données (couple et vitesse) sont utilisées à la conception hors-ligne du contrôleur SVM. Pour voir l'efficacité de la stratégie proposée par rapport à d'autres méthodes, un contrôleur par la méthode SMC est conçu et puis appliqué sur la même hydrolienne.

## 5.1. Modélisation des ressources de la marée

### 5.1.1. Théorie de la marée

Selon la loi universelle de la gravitation, les masses liquides des mers et des océans sont attirées par les objets célestes les plus influents : la Terre, la Lune et le Soleil. En particulier, le point le plus proche de la Lune est plus attiré que le point à l'opposé. Une première composante de la force de marée résulte donc de la différence d'attraction entre celle de la Terre et de celle de la Lune, selon le barycentre Terre-Lune.

Le même phénomène existe pour l'ensemble des astres, et en particulier pour le Soleil. Bien éloigné de la Terre, il exerce une forte influence en raison de sa masse élevée.

D'autre part, la Terre tourne autour du barycentre du système Terre-Lune, ce qui soumet les objets situés à sa surface à une force centrifuge. De façon simplifiée, la marée résulte donc de la combinaison de ces deux forces ; la force résiduelle résultant de la combinaison des différentes forces d'attraction, et une force centrifuge due à la rotation du système Terre-Lune.

#### Le potentiel générateur

La présence de la Lune et du Soleil est à l'origine de forces de gravitation qui produisent les marées. La force génératrice de la marée dérive d'un potentiel lié à la distance de la Terre à la Lune, soit environ 380 000 km, alors que le rayon de la Terre est environ 6 400 km. La Terre peut donc être représentée par un point matériel placé au centre de notre globe et affecté de toute la masse terrestre. Cependant l'attraction que subit une particule en un point quelconque du globe diffère en amplitude.

Notons  $\Pi$  le potentiel dont dérive la force génératrice de la marée. Dans un repère géocentrique on écrit ce potentiel appliqué à un point P de la surface du globe, affecté des coordonnées  $(a, \lambda, \phi)$  sous la forme :

$$\Pi_{P(a,\lambda,\phi)} = -GM_{Lune}/d \quad (4.43)$$

Avec : G est la constante de gravitation,  $M_{Lune}$  est la masse du corps céleste perturbateur, d est la distance entre le point  $P(a,\lambda,\phi)$  et le centre du corps céleste perturbateur,  $R_{Lune}$  est la distance

entre le centre de la Terre et celui du corps céleste perturbateur,  $a$  est le rayon de la terre,  $\psi$  l'angle zénithal du corps céleste perturbateur au point P.

On peut exprimer  $d$  en fonction de  $a, R_{Lune}, \phi$  par la relation issue du théorème d'Al-Kashi (figure 4.33) :

$$d^2 = a^2 + R_{Lune}^2 - 2aR_{Lune} \cos \psi \quad (4.44)$$

Si on exprime  $1/d$ , l'équation précédant (4.44) devient :

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{R_{Lune} \sqrt{1 - 2 \frac{a}{R_{Lune}} \cos \psi + \frac{a^2}{R_{Lune}^2}}} \quad (4.45)$$

La lune et le soleil sont les seuls corps célestes dont l'influence est notable dans la génération des marées sur la Terre, l'un en raison de sa proximité, l'autre en raison de sa masse.

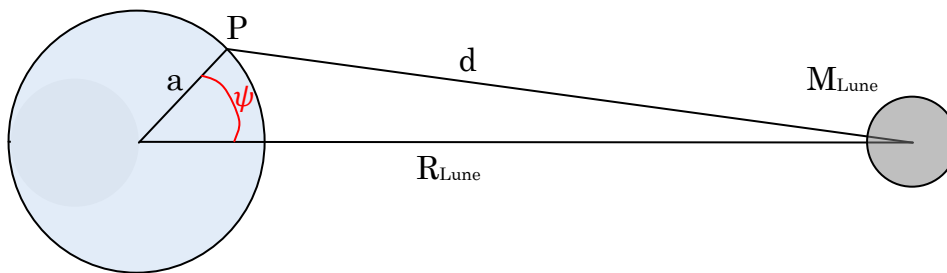


Figure 4. 33, illustration du potentiel générateur du système Terre-Lune

Le terme  $\frac{a}{R_{Lune}}$  vaut environ  $1/60$  pour la lune et  $1/(2.5 \cdot 10^4)$  pour le soleil. On peut donc estimer que  $\frac{a}{R_{Lune}} \ll 1$

Il devient donc possible, avec cette supposition, de décomposer l'équation 4.45, sous la forme d'une série en  $\frac{a}{R_{Lune}}$  à l'aide de polynôme de Legendre.

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{R_{Lune}} \sum_{n=0}^{\infty} \left( P_n(\cos \psi) \left( \frac{a}{R_{Lune}} \right)^n \right) \quad (4.46)$$

Avec les polynômes de légender sont définit par :

$$P_0(\cos \psi) = 1 ; P_1(\cos \psi) = \cos \psi ; P_2(\cos \psi) = \frac{3}{2} \cos^2 \psi - \frac{1}{2};$$

$$P_{n+1}(\cos \psi) = \frac{2n+1}{n+1} \cos \psi \cdot P_n(\cos \psi) - \frac{n}{n+1} \cdot P_{n-1}(\cos \psi) ;$$

C'est là qu'intervient une subtilité. Le terme principal de la série est celui d'ordre 1, qui est proportionnel à  $\cos \psi$ . Ce terme a une période angulaire de 360 degrés, ce qui signifie qu'il décrit un cycle de marée haute - marée basse en 24 heures. Or le cycle des marées est d'environ 12 heures. Pour résoudre cette question, il convient de préciser que le référentiel dans lequel on analyse le problème n'est pas galiléen, car la Terre et la Lune ne sont pas immobiles (comme montré dans la figure), mais elles sont en rotation autour de leur centre de gravité commun. L'analyse rigoureuse des forces oblige donc à ajouter au potentiel décrit par (eq 1.1) un terme de potentiel décrivant la force d'entraînement de notre référentiel (qui est en l'occurrence une force centrifuge) pour pouvoir appliquer les lois de la mécanique. Or ce terme centrifuge compense et annule exactement le terme d'ordre 1 de la série. Le terme le plus grand de la série devient alors celui d'ordre 2(deux).

Si on se limite à l'ordre 2 (deux) qui représente déjà 98 % du signal, on peut écrire le potentiel (eq 4.43) sous la forme :

$$\Pi_{P(a,\lambda,\phi)} = -GM_{Lune}/d \approx -\frac{3}{2}GM_{Lune} \frac{a^2}{R_{Lune}^3} \left( \cos^2 \psi - \frac{1}{3} \right) \quad (4.47)$$

On donne les coordonnées  $(R_{Lune}, \lambda_{Lune}, \phi_{Lune})$  au corps celeste et les coordonnées  $(R_P, \lambda_P, \phi_P)$  au point du globe P, on peut donc exprimer  $\cos \psi$  sous la forme :

$$\cos \psi = \sin \phi_{Lune} \sin \phi_P + \cos \phi_{Lune} \cos \phi_P \cos(\lambda_P - \lambda_{Lune}) \quad (4.48)$$

L'équation (4.47) devient alors :

$$\begin{aligned} \Pi_{P(a,\lambda,\phi)} = & \\ & -\frac{3}{4}GM_{Lune} \frac{a^2}{R_{Lune}^3} \left( \frac{1}{3} (1 - 3 \sin^2 \phi_{Lune})(1 - 3 \sin^2 \phi_P) + \right. \\ & \left. \sin(2\phi_{Lune})\sin(2\phi_P) \cos(\lambda_P - \lambda_{Lune}) + \cos^2 \phi_{Lune} \cos^2 \phi_P \cos 2(\lambda_P - \lambda_{Lune}) \right) \end{aligned} \quad (4.49)$$

Si on détaille chacun des trois termes de l'équation (eq 4.49), et que l'on ne considère que le mouvement de rotation de la Terre en un jour, nous pouvons obtenir les termes de génération des premières ondes de marée.

- 1- Le terme  $\cos^2 \phi_{Lune} \cos^2 \phi_P \cos 2(\lambda_P - \lambda_{Lune})$  effectue deux périodes lors d'une rotation de l'angle  $(\lambda_P - \lambda_{Lune})$  de  $2\pi$  (rotation de la Terre en 1 jour), il décrit donc une fonction semi-diurne.
- 2- Le terme  $\sin(2\phi_{Lune})\sin(2\phi_P) \cos(\lambda_P - \lambda_{Lune})$  n'effectue qu'une période lors d'une rotation, il décrit donc une formule diurne.

Enfin le terme  $(1 - 3 \sin^2 \phi_{Lune})(1 - 3 \sin^2 \phi_P)$  ne dépend pas de la longitude mais uniquement de la latitude du corps céleste et du point de mesure, ce terme varie en fonction du mouvement de déclinaison du corps céleste (*periode*  $\gg 24$  heures), il décrit donc une fonction longue période.

### 5.1.2. Vitesse du courant de la marée

Pour modéliser la vitesse de la marée, plusieurs méthodes se basent sur le principe de Bernouille :

$$V = \sqrt{2Gz} \quad (4.50)$$

G et z, sont respectivement la constante de gravitation terrestre, et la différence des hauteurs d'eau. A un instant et une position données, la hauteur peut être calculée comme suite :

$$H(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4.51)$$

Avec  $H_0$  est la hauteur moyenne de la mer,  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\varphi_i$ , sont respectivement l'amplitude, la fréquence et l'angle de la  $i^{ème}$  harmonique individuelle. Le tableau (4.3) présente les principales composantes harmoniques de la marée qui vont définir la vélocité.

A l'aide du tableau 4.3, et des équations 4.50 et 4.51, la vélocité de la marée entre deux hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  est :

$$V = K_L \sqrt{2g(H_1(t) - H_2(t))} \quad (4.52)$$

$K_L$  représente les pertes de charge du canal,  $H_1(t)$  et  $H_2(t)$  sont respectivement les hauteurs à l'entrée du canal et à sa sortie. La figure 4.34, illustre la vitesse des courants de la marée. Le calcul du facteur  $K_L$  est fait en utilisant un modèle d'un canal idéal.

$$V = \frac{k R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (4.53)$$

$$R = \frac{W d}{W + 2d} \quad (4.54)$$

$$S = \frac{d_1 - d_2}{l} \quad (4.55)$$

S est la pente du canal, n est le coefficient de Gauckler-Mannig, W est la largeur du canal, d est la profondeur du canal,  $d_1$  et  $d_2$  son respectivement les profondeurs d'entrée du canal et de sortie. l est la longueur du canal.

La substitution de l'équation 4.52 dans 4.53 permet d'obtenir  $K_L$  comme suite :

$$K_L = \frac{k R^{2/3} S^{1/2}}{n \sqrt{2g(H_1(t) - H_2(t))}} \quad (4.56)$$

TABLEAU 4.3 :LES COMPOSANTES DU HARMONIQUE DE LA MAREE

Constituants harmonique	Définition	W (rad/heure)
M2	Semi-journalier lunaire principale (Principal lunar semi-diurnal)	0.5059
N2	Semi-journalier solaire principale (Principal solar semi-diurnal)	0.5236
S2	Semi-journalier elliptique lunaire large (Larger lunar elliptic semidiurnal)	0.4946
K1	Déclinaison journalière lune-soleil (Lunar-solar declinational diurnal)	0.2625
O1	Déclinaison journalière lunaire (Lunar declinational diurnal)	0.2434
M4	Première marée haute de M2 (First over-tide of M2)	1.0117
M6	Deuxième marée haute de M2 (Second over-tide of M2)	1.5176

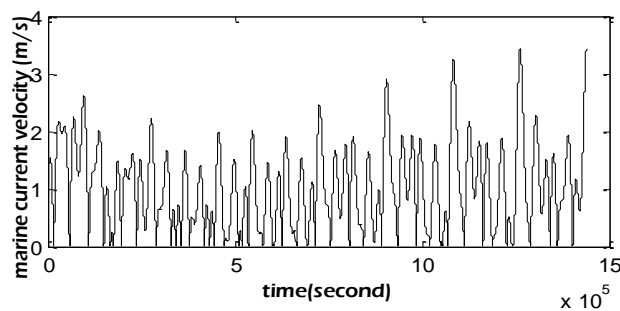


Figure 4. 34, vélocité de la marée

### 5.2. Résultats de simulation

Les deux stratégies de commande, SVM et SMC, sont appliquées sur une turbine marine. La représentation schématique du contrôleur SVM à la figure 4.35, montre une seule entrée (vitesse de la marée) et une seule sortie (commande en couple). Les différentes conditions des vitesses du courant de la marée sont vérifiées. Les profils théoriques contiennent des changements brusques et en rompes. Le profil réel est basé sur les composantes du tableau 4.3.

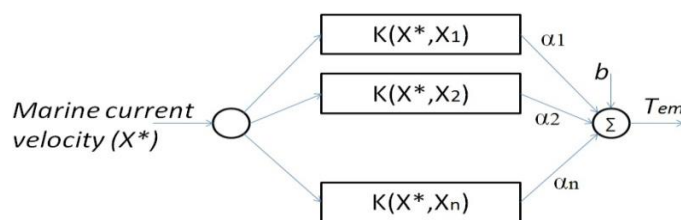


Figure 4.35, schéma du contrôleur SVM

### 5.2.1. Testes sous changements théoriques

Dans cette sous section, des changements trapézoïdaux aux courants d'eau sont appliqués. La vitesse augmente soudainement après 100 seconds de 1.8 m/s à 2.8 m/s, et diminue après 200 seconds jusqu'à 2.2 m/s. Ensuite des changements sous forme trapézoïdale sont appliqués à l'instant 300 seconds et 500 seconds comme il est illustré par la figure suivante (figure4.36).

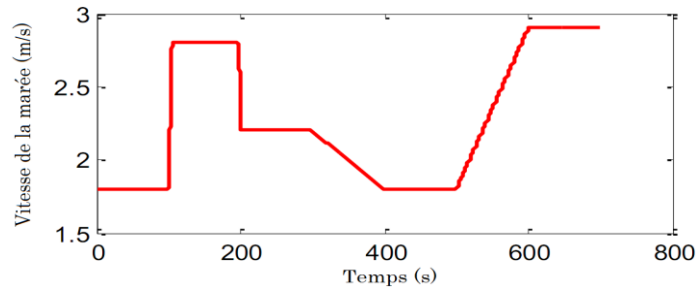


Figure 4.36 : Profile théorique proposé de la marée

Le mode glissant est appliqué avec un gains de commutation élevé égale à 0.3 et un gain bas égale à 0.03. La figure (4.37 – a), montre l'effet négatif d'augmentation du gain. Le phénomène de réticence n'est pas accepté même si la poursuite est bonne (figure4.37 – b). A la figure (4.38 – a) le phénomène de réticence n'est pas remarquable. Néanmoins, la poursuite est très faible vis-à-vis les changements rapides de la vitesse de la marée (figure 4.38 – b). La commande par SVM (représenté par la ligne bleu) se comporte d'une manière parfaite.

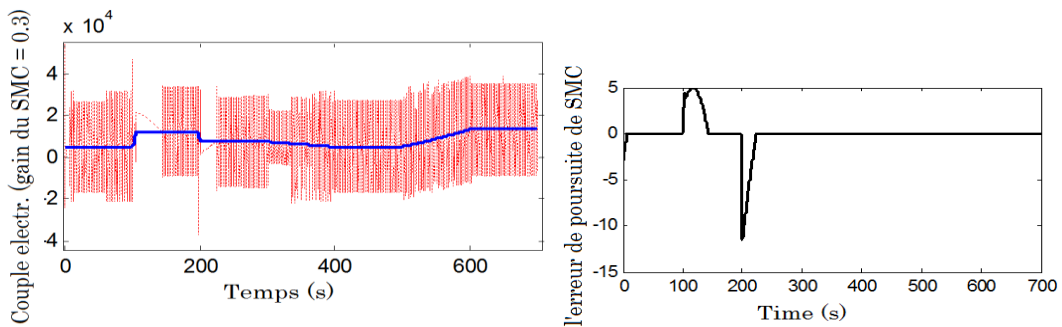


Figure 4.37 : (a) couple elect. (gain = 0.3) (b) l'erreur de poursuite

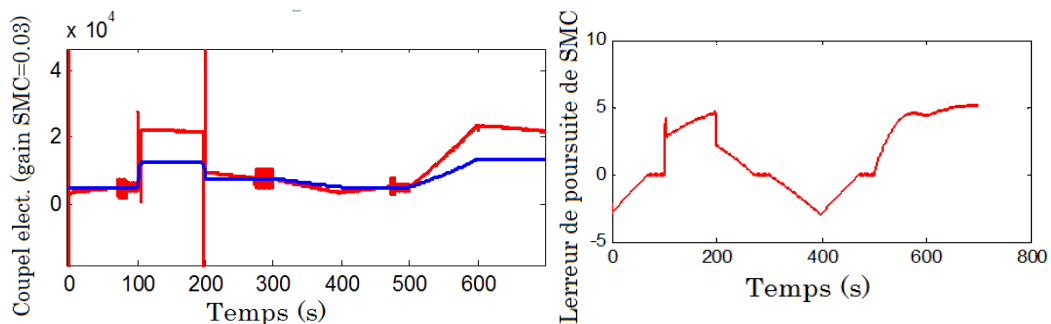


Figure 4.38 : (a) couple elect. (gain = 0.03) (b) l'erreur de poursuite

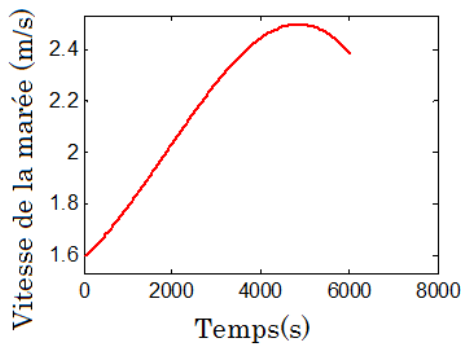


Figure 4.39 : une partie du profile réel du courant de la marée

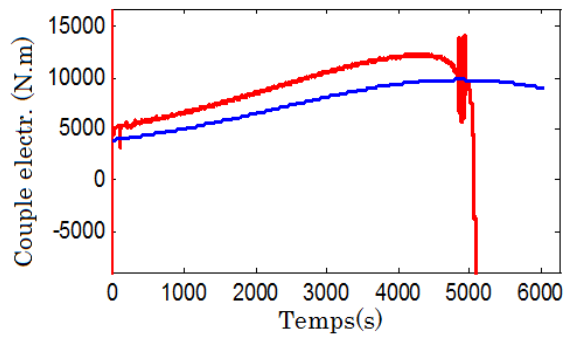


Figure 4.40 : couple électromagnétique

### 5.2.2. Test par un profile réel

Dans cette sous-section un profile plus réaliste est appliqué (figure 4.39). Puisque la commande SMC ne peut pas être fonctionnelle avec un gain élevé à cause du phénomène de réticence, un gain de 0.03 sera considéré dans cette comparaison. La commande par SVM est toujours stable (figure 4.40), la ligne bleu représente le mode glissant, et la ligne rouge représente le SMC.

En bref la commande par SVM est fiable pour les systèmes de production de l'énergie de la marée.

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de commande nouvelle est exposée. Cette stratégie convient parfaitement sur les systèmes éoliennes, et permet de dépasser toutes les difficultés rencontrées dans la commande. Au niveau théorique comme au niveau pratique, une telle stratégie pourra être la meilleure en terme de stabilité et de convergence. L'implémentation réelle est mise en considération pour augmenter le taux d'intérêt de cette méthode. Par ailleurs, le système de production de l'énergie des courants de la marée comporte beaucoup de similarité par rapport au système éolien. C'est la raison pour laquelle la commande par SVM est introduite sur les hydroliennes. Les résultats obtenues sont satisfaisants.

Le présent chapitre met en œuvre la commande de la partie mécanique du système éolien/hydrolienne. Dans le chapitre suivant, la partie électrique utilisée pour l'aérogénérateur et l'hydrolienne sera considéré. Cette partie est destinée à l'injection de l'énergie générée au réseau électrique triphasé. A coté de l'énergie éolienne/hydrolienne, l'énergie photovoltaïque vue au chapitre 3 est aussi formulée pour qu'il soit injecté au réseau électrique. Les différents types de convertisseurs qui alimentent les réseaux électriques doivent être correctement utilisés. les

## Chapitre 4 : Commande d'un système éolien / hydrolienne

commande seront établis entre différents convertisseurs pour avoir une cohérence entre les types d'énergies renouvelables ; ce qu'on appelle la commande d'un système énergétique hybride.

## **CHAPITRE 5 :**

### **Commande d'un système d'énergie renouvelable hybride**

#### **1. Introduction**

Le secteur de l'énergie est le responsable principale d'effet de serre. L'objectif des chercheurs est de donner des solutions susceptibles de fournir des énergies propres et sans effets nuisibles. L'une des solutions proposées, présentant un niveau supérieur d'intérêt, est le système énergétique renouvelable hybride.

Le système énergétique hybride est un système qui produit une énergie issue de plusieurs sources renouvelables d'une manière cohérente. Le photovoltaïque solaire et l'énergie éolienne sont les deux sources marquantes, existantes dans la plupart des coins du monde. Bien que la combinaison de ces deux sources permet un niveau d'autonomie relativement élevée, l'ajout d'une ou plusieurs autres énergies renouvelables fournira une autonomie encore meilleur. Permis les bénéfices de ce système, on cite :

- L'augmentation de la qualité de l'énergie
- L'amélioration de l'efficacité énergétique
- La sécurité énergétique supérieur et la faible probabilité de rupture
- Elargir les champs d'utilisation du renouvelable
- Réduire l'effet de serre

La commande et la gestion d'un tel système demeure une tache compliquée à accomplir. Ce chapitre présentera l'hybridation des trois sources énergétiques renouvelables (photovoltaïque, éolienne et hydrolienne) et leurs commandes. En plus de la commande de chaque système pour qu'il fonctionne d'une manière optimale, on va établir une solution qui combine ces trois sources, d'où la naissance d'un système énergétique hybride.

#### **2. Energie solaire injectée au réseau électrique**

L'étude technologique de la génération d'énergie solaire peut en grande partie résoudre la crise énergétique, réduire la pollution de l'environnement et promouvoir un développement économique. Parmi les applications les plus importantes de l'énergie solaire sont celles des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

Cette partie aborde la commande du système photovoltaïque connecté au réseau triphasé. Cette tache peut être effectuée en se basant sur deux schématiques possibles ; avec ou sans

convertisseur DC/DC. Lorsqu'on possède une installation photovoltaïque qui génère un voltage relativement supérieur à ce de réseau, l'intégration d'un convertisseur DC/DC demeure inefficace. Par ailleurs, une installation qui génère une petite tension nécessite l'intégration d'un convertisseur DC/DC (hacheur) qui joue le rôle d'un élévateur de tension. Un onduleur est susceptible de transformer la puissance continue issue des générateurs photovoltaïques (ou de la sortie du convertisseur DC/DC) en une puissance alternative triphasée prête pour qu'elle soit injectée au réseau. La poursuite du point de puissance maximale (PPM) peut se faire de différentes manière, et à travers différentes composantes ; en effet, la commande qui réalise la poursuite du PPM peut être appliquée au niveau du hacheur, comme au niveau de l'onduleur.

### 2.1. Energie photovoltaïque pour des applications monophasées (domestique)

Le modèle du générateur photovoltaïque est vue dans le chapitre 3 où la charge étudiée été un pompage d'eau. Dans cette section, la charge considérée est un réseau monophasé. La configuration schématique de cette installation photovoltaïque est illustré dans la figure 5.1. le générateur photovoltaïque est connecté à un hacheur qui débite dans un onduleur. Le rôle de l'étage hacheur est de soustraire la puissance maximale depuis le générateur photovoltaïque. L'onduleur convertit le signal DC issu du hacheur en une énergie alternative en phase avec la tension du réseau (secteur). Le filtre à la sortie de l'onduleur permet d'avoir un signal sinusoïdal lisse [Haz-14, Lia-08].

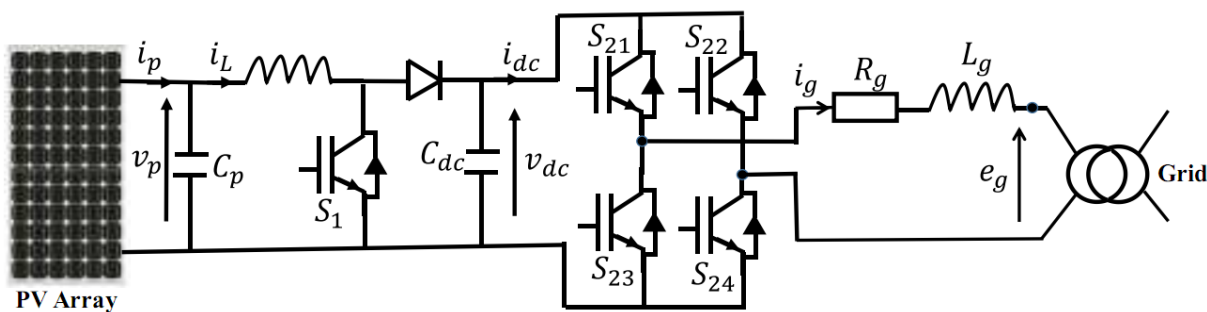


Figure 5.1 : schéma globale du système de production de l'énergie solaire photovoltaïque injectée au réseau électrique monophasé.

#### 2.1.1. Modélisation du système photovoltaïque monophasé

Il est remarqué à partir de la figure 5.1. que parmi les composantes du hacheur il y a un interrupteur  $S_1$ . Quatre autres interrupteurs  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{23}$ , et  $S_{24}$  sont insérés dans l'onduleur. Ces interrupteurs sont l'outil de commande du système étudié. Lorsque la commande est obtenue sous forme d'un ratio, elle est transformée à l'aide d'un modulateur de largeur d'impulsion (largement connue sous le nom anglais pulse-width modulator PWM). La fréquence de ce dernier est suffisamment rapide de sorte que la commande appliquée influe sur le système

proportionnellement à l'ordre de grandeur du ratio. Le modèle mathématique du système peut être approximé finalement par les équations différentielles suivantes :

$$\frac{\partial V_p}{\partial t} = \frac{1}{C_p} i_p - \frac{1}{C_p} i_L \tag{5.1}$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial t} = \frac{1}{L} V_p - \frac{1}{L} (1 - u_1) V_{dc} \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial V_{dc}}{\partial t} = \frac{1}{C_{dc}} (1 - u_1) i_L + \frac{1}{C_{dc}} (1 - 2u_2) i_g \tag{5.3}$$

$$\frac{\partial I_g}{\partial t} = -\frac{1}{L_g} R_g i_g - \frac{1}{L_g} e_g - \frac{1}{L_g} (1 - 2u_2) V_{dc} \tag{5.4}$$

$$y_1 = \frac{\partial P}{\partial V_p} = I_p + V_p \frac{\partial I_p}{\partial V_p} \tag{5.5}$$

$$y_2 = I_g \tag{5.6}$$

Les variables  $y_1$  et  $y_2$  sont les sorties commandées du système de puissance. Les commandes  $u_1$  et  $u_2$  après qu'elles soient convertie en  $\mu_1$  et  $\mu_2$ , attaquent respectivement le hacheur et l'onduleur.

La tension du secteur  $e_g = A \cdot \sin(\omega t)$  est supposée sinusoïdale avec une amplitude constante A et une fréquence  $\omega = 2\pi f$ .

### 2.1.2. La stratégie de commande d'un système photovoltaïque monophasé

Le rôle de la commande est d'assurer le transfert de l'énergie du générateur photovoltaïque vers le réseau électrique monophasé, tout en gardant les objectifs suivants :

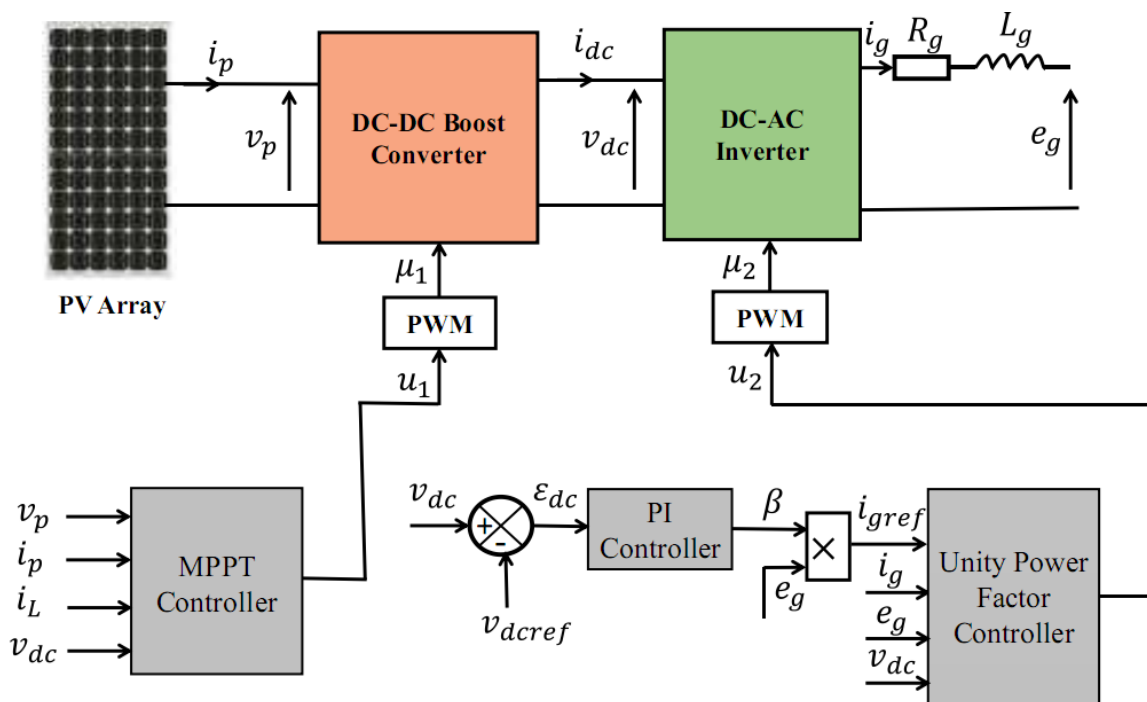


Figure 5.2 : schématique des commandes du système photovoltaïque

- Assurer la maximisation de la puissance extraite depuis le générateur photovoltaïque pour différentes conditions climatiques.
- L'énergie injectée au réseau électrique doit être en phase et de même amplitude.
- La régulation du bus DC.

Pour avoir une commande qui permet d'atteindre ces objectifs, on va concevoir une commande par mode glissant qui se base sur le modèle mathématique du système. La structure générale du système commandé est illustrée par la figure (5.2).

### 2.1.2.1. Contrôleur du point de puissance maximale

Le contrôleur du point de puissance maximale doit opérer le générateur photovoltaïque pour qu'il produit le maximum de puissance à chaque éclairement / température. Par le signal  $u_1$  on commande le hacheur pour forcer la sortie  $y_1 = \frac{\partial P}{\partial V_p}$  vers  $y_{1-ref} = 0$ .

La sortie du système est :  $y_1 = \frac{\partial P}{\partial V_p} = I_p + V_p \frac{\partial I_p}{\partial V_p}$

La dérivée première et deuxième par rapport au temps de la sortie du système donne respectivement :

$$\dot{y}_1 = \frac{\partial V_p}{\partial t} \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right) \quad (5.7)$$

$$\ddot{y}_1 = \frac{\partial^2 V_p}{\partial t^2} \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right) + \left( \frac{\partial V_p}{\partial t} \right)^2 \left( 3 \times \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} + V_p \frac{\partial^3 I_p}{\partial V_p^3} \right) \quad (5.8)$$

$$\text{Avec } \frac{\partial^2 V_p}{\partial t^2} = \frac{1}{c_p} \left( \frac{\partial I_p}{\partial V_p} \frac{\partial V_p}{\partial t} - \frac{1}{L} (V_p + 1) \right) - \frac{V_{dc}}{c_p L} u_1$$

$\ddot{y}_1$  peut être écrite sous la forme  $\ddot{y}_1 = f_1 + g_1 u_1$

$$\text{Avec } f_1 = \frac{1}{c_p} \left( \frac{\partial I_p}{\partial V_p} \frac{\partial V_p}{\partial t} - \frac{1}{L} (V_p - 1) \right) \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right) + \left( \frac{\partial V_p}{\partial t} \right)^2 \left( 3 \times \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} + V_p \frac{\partial^3 I_p}{\partial V_p^3} \right)$$

$$\text{Et } g_1 = - \frac{V_{dc}}{L c_p} \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right)$$

Le terme de commande  $u_1$  figure après la deuxième dérivation de l'erreur. Le degré relatif sera donc  $r_1 = 2$ .

La surface de glissement est :

$$s_1 = \dot{e}_1 + k_1 e_1 \quad (5.9)$$

Avec  $e_1 = y_1 - y_{1-ref}$  est l'erreur de poursuite et  $\dot{e}_1$  sa dérivée.

Au régime statique le système fonctionne sur la surface de glissement. Dans ces conditions la surface  $s_1$  et sa dérivée  $\dot{s}_1$  sont théoriquement nulles. On aura donc l'égalité suivante :

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = \ddot{e}_1 + k_1 \dot{e}_1 &= 0 \\ \dot{s}_1 = \ddot{y}_1 + k_1 \dot{y}_1 = f_1 + g_1 u_1 + k_1 \dot{y}_1 &= 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

La commande équivalente est donc :

$$u_{1\_equivalente} = -\frac{1}{g_1} (f_1 + k_1 \dot{y}_1) \quad (5.11)$$

La commande par commutation est :

$$u_{1\_sign} = -\frac{k_{11}}{g_1} \text{sign}(s_1) \quad (5.12)$$

Finalement la commande par mode glissant du hacheur est la somme des deux composantes de commande :

$$u_1 = u_{1\_equivalente} + u_{1\_sign} \quad (5.13)$$

Cette commande est destinée pour attaquer le hacheur par le biais du PWM. Elle force le système à poursuivre la sortie désirée  $y_{1-ref}$ , ce qui correspond au fonctionnement au point de puissance maximale.

### 2.1.2.2. Contrôleur de l'onduleur monophasé

Le signal  $u_2$  est destiné à commander l'onduleur. Cette commande est réalisée par deux boucles de commande en cascade. Le rôle de la première est d'établir un signal sinusoïdal en phase avec le signal du réseau. La deuxième boucle s'occupe du réglage du tension du bus continue.

Pour assurer un signal sinusoïdal similaire à ce du réseau monophasé, on considère le courant du réseau comme une référence à poursuivre :

$$i_{g\_ref} = \beta e_g = \beta A \sin(\omega t) \quad (5.14)$$

Le paramètre  $\beta$  est ajustable, et peut être réglé par un régulateur PI. On s'intéresse maintenant à la commande par mode glissant du signal  $u_2$ .

L'erreur de poursuite est établit sous la forme suivante :

$$e_2 = i_g - i_{g.ref} \quad (5.15)$$

La dérivée première de l'erreur  $e_2$  fait apparaître le signal de commande :

$$\dot{e}_2 = \frac{\partial I_g}{\partial t} - \frac{\partial I_{g.ref}}{\partial t} = -\frac{1}{L_g} R_g i_g - \frac{1}{L_g} e_g - \frac{1}{L_g} (1 - 2u_2) V_{dc} - \frac{\partial I_{g.ref}}{\partial t} \quad (5.16)$$

Le degré relatif est donc  $r_2 = 1$ , la surface de glissement cette fois est égale à l'erreur  $e_2$  :

$$s_2 = e_2 \quad (5.17)$$

Au régime stationnaire, le système fonctionne sur la surface de glissement, alors :

$$\dot{s}_2 = -\frac{1}{L_g} R_g i_g - \frac{1}{L_g} e_g - \frac{1}{L_g} (1 - 2u_2) V_{dc} - \frac{\partial I_{g.ref}}{\partial t} = 0 \quad (5.18)$$

La commande équivalente est donc :

$$u_{2.equivalente} = \frac{1}{2V_{dc}} \left( L_g \frac{\partial I_{g.ref}}{\partial t} + R_g i_g + e_g + V_{dc} \right) \quad (5.19)$$

La commande par commutation est :

$$u_{sign} = -k_{22} \text{sign}(s_2) \quad (5.20)$$

Finalement, la commande par mode glissant du signal de  $u_2$  est la somme des deux commandes ci-dessus :

$$u_2 = u_{2.equivalente} + u_{sign} \quad (5.21)$$

Le réglage du paramètre  $\beta$  se réalise par un régulateur PI. L'objectif est de forcer l'erreur  $e_3 = V_{dc} - V_{dc.ref}$  à converger vers zéro.

$$\beta = k_3 e_3 + k_4 \int_0^t e_3 dt \quad (5.22)$$

Les termes  $k_3$  et  $k_4$  sont respectivement le gain proportionnel et intégrale du régulateur.

### 2.1.3. Simulations du générateur photovoltaïque monophasé

Dans cette partie, on va simuler un générateur photovoltaïque branché au réseau électrique monophasé. Les étapes de simulation se composent par deux scénarios ; il y aura un changement en éclaircissement de 600 Watt/m<sup>2</sup> à 1000 Watt/m<sup>2</sup> après une seconde de fonctionnement et un autre changement à la température de 298.15°C à 328.15°C après 3 secondes de fonctionnement. Dans

les figures de simulation, la courbe en bleu représente les tensions et la rouge représente les courants.

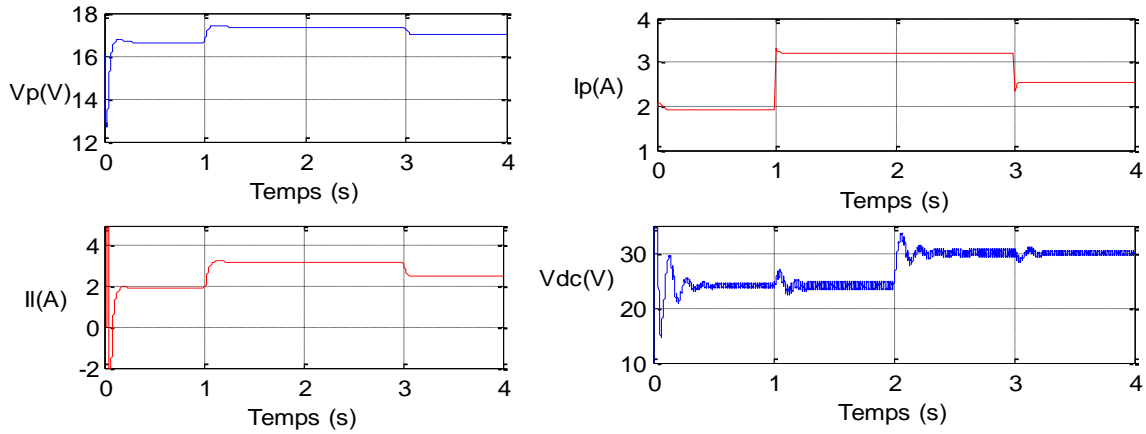


Figure 5.3 : tension du générateur photovoltaïque ( $V_p$ ), tension du bus continue ( $V_{dc}$ ), courant du générateur photovoltaïque ( $I_p$ ) et courant du hacheur ( $I_l$ ).

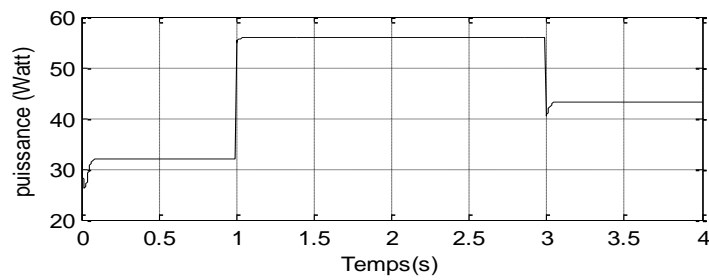


Figure 5.4 : la puissance générée par le panneau photovoltaïque utilisé.

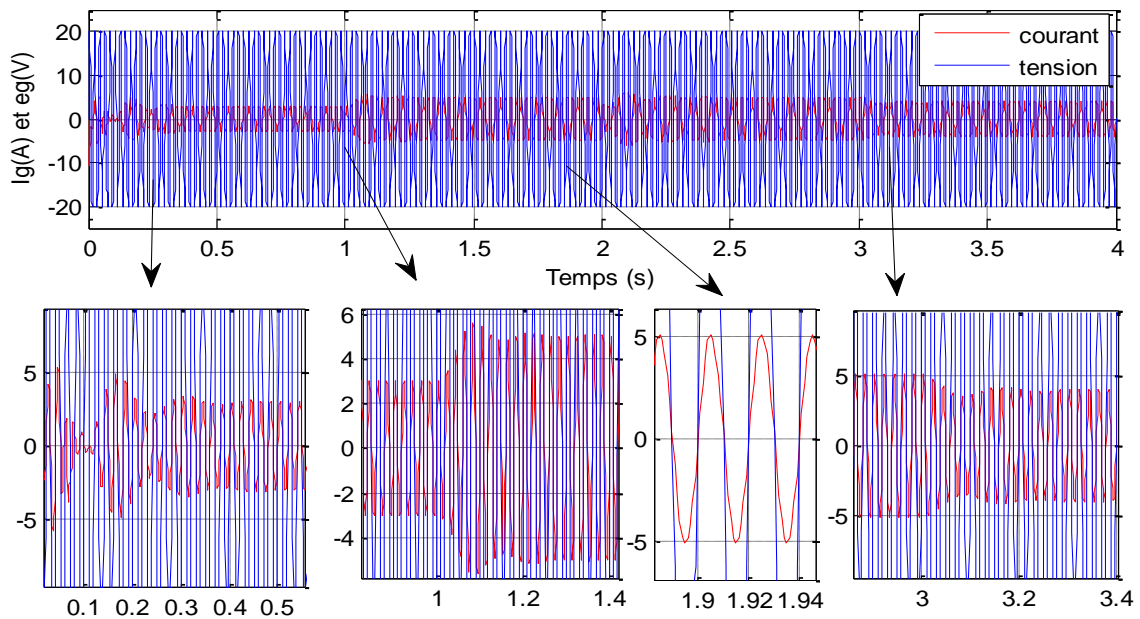


Figure 5.5 : tension et courant injectés au réseau électrique

A partir de la figure 5.3, on constate que les différentes grandeurs poursuivent les changements exercés en éclairement et en température. Ce rôle est joué par le hacheur commandé depuis son interrupteur par le biais d'un PWM. La figure 5.4, montre la puissance générée dans ces différentes conditions climatiques. La puissance sous forme continue issue du hacheur est débitée dans un onduleur qui va la convertir sous forme alternative (figure 5.5). La réalisation de cette tâche est assurée par l'intervention de deux régulateurs en cascade (un contrôleur en mode glissant et l'autre est un PI) qui vont forcer le courant généré à poursuivre le courant de référence. Lors de l'obtention d'un courant alternatif adéquat (en terme de fréquence et d'amplitude de la tension) à l'injection au réseau monophasé, on insert un transformateur élévateur de tension. Dans cette simulation, la tension efficace considérée est de 22 volts, on aura besoin d'un transformateur avec un rapport de transformation égale à 10, ce qui va donner 220 volts.

## 2.2. Energie photovoltaïque injectée au réseau triphasé

Dans cette partie, on va considérer la commande d'un générateur photovoltaïque branché au réseau triphasé. Ce branchement est assuré par un hacheur et un onduleur triphasé [Mah-12]. Le rôle du hacheur est d'extraire la puissance maximale depuis le générateur PV, tandis que l'onduleur assure une puissance réactive nulle et une puissance active maximale lors de l'injection. La configuration schématique de cette installation est illustrée à la figure 5.6.

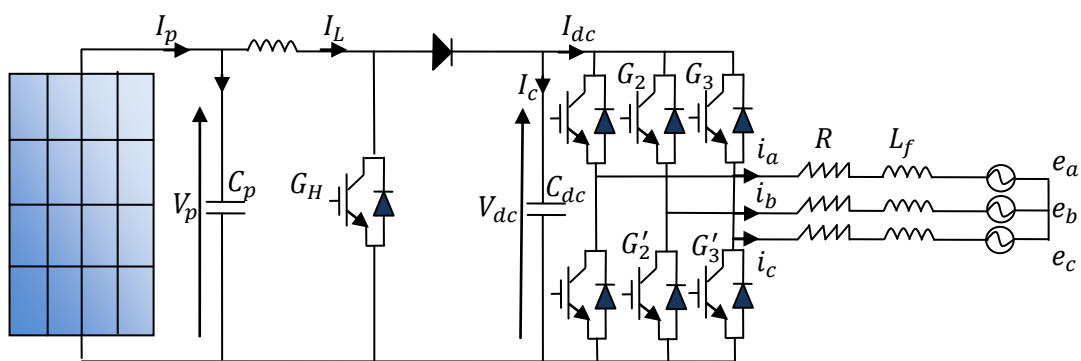


Figure 5.6 : configuration du générateur photovoltaïque branché au éléments de puissance

Les sources de tension  $e_a$ ,  $e_b$  et  $e_c$  du réseau triphasé sont branchées au filtre passe bas qui absorbe les harmoniques du signal issue de l'onduleur. Le filtre est une inductance identique insérée sur chaque phase de l'onduleur, sa résistance interne est aussi considérée. Les interrupteurs commandés de l'onduleur sont des semi-conducteurs idéal qui prennent deux états de fonctionnement ; passants ou bloqués.

### 2.2.1. Modélisation du système photovoltaïque triphasé

Dans cette modélisation, il est supposé que :

- Tous les interrupteurs sont idéals, identiques et marchent en mode de conduction continue.
- Les filtre des trois phases sont identiques.
- Le voltage du réseau est symétrique-équilibré.

Le modèle mathématique du système global est établi sous la forme suivante :

$$\frac{\partial V_p}{\partial t} = \frac{1}{C_p} i_p - \frac{1}{C_p} i_L \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial t} = \frac{1}{L} V_p - \frac{1}{L} (1-u) V_{dc} \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial V_{dc}}{\partial t} = \frac{1}{C_{dc}} (1-u) I_L - \frac{3}{2C_{dc}} C_d i_d - \frac{3}{2C_{dc}} C_q i_q \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial I_d}{\partial t} = w i_q - \frac{r}{L_f} i_d - \frac{1}{L_f} E_d + \frac{V_{dc}}{L_f} C_d \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial I_q}{\partial t} = -w i_d - \frac{r}{L_f} i_q - \frac{1}{L_f} E_q + \frac{V_{dc}}{L_f} C_q \quad (5.27)$$

Avec

$$\begin{cases} (E_d, E_q, E_0)^T = T_{abc}^{dq0} (e_a, e_b, e_c)^T \\ (i_d, i_q, i_0)^T = T_{abc}^{dq0} (i_a, i_b, i_c)^T \\ (C_d, C_q, C_0)^T = T_{abc}^{dq0} (C_1, C_2, C_3)^T \end{cases}$$

$T_{abc}^{dq0}$  est la transformation de Park qui ramène les grandeurs alternatives triphasées équilibrées à des grandeurs continues directes et en quadratures. Il est exprimée par :

$$T_{abc}^{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$E_d$  ,  $i_d$  et  $C_d$  sont respectivement les composantes direct de la tension, du courant et de la commande de l'onduleur.  $E_q$  ,  $i_q$  et  $C_q$  sont respectivement les composantes de quadrature de la tension, du courant et de la commande de l'onduleur.

La puissance générée étant  $P = I_p V_p$ ,

$(V_p, I_L, V_{dc}, i_d, i_q)^T$  est le vecteur d'état.

$(u, C_d, C_q)^T$  est le vecteur de commande.

$u$  est le rapport cyclique. Il doit être réglé continuellement pour extraire une énergie maximale du générateur photovoltaïque.

$C_1, C_2$  et  $C_3$  sont respectivement les commandes à la sortie du PWM (pulse width modulation) qui attaquent les interrupteurs  $(G_1, G'_1), (G_2, G'_2)$  et  $(G_3, G'_3)$ . Ces derniers prennent deux états ; soit passants soit bloqués. Dans le cas où l'interrupteur  $G_i$  est passant,  $G'_i$  est bloqué ;  $i = 1, 2$  ou  $3$ .

### Sorties du système

Le présent système contient trois sorties ; une pour superviser la puissance générée à partir du générateur photovoltaïque  $y_1 = \frac{\partial P}{\partial V_p} = I_p + V_p \frac{\partial I_p}{\partial V_p}$  , les deux autres pour la supervision de la puissance active transmise au réseau et à la puissance réactive échangée. L'expression de la puissance active et la puissance réactive est :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(E_d i_d + E_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(E_q i_d - E_d i_q) \end{cases} \quad (5.28)$$

Si on garde la tension de quadrature  $E_q$  nulle, on obtiendra la nouvelle expression des puissances:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}E_d i_d \\ Q = -\frac{3}{2}E_d i_q \end{cases} \quad (5.29)$$

Sachant que  $E_d$  est une constante positive, la maximisation de la puissance active  $P$  se fait uniquement par la commande du courant direct  $i_d$  pour qu'il prenne sa valeur maximale.

De même pour l'échange de la puissance réactive, on commande le courant  $i_q$  pour qu'il converge vers zero. Ceci est susceptible d'annule le déphasage entre la tension du réseau et le courant de l'onduleur.

### **2.2.2. Conceptions des commandes**

Dans cette section une commande par mode glissant est établie pour la maximisation de la puissance du générateur photovoltaïque. La synchronisation de l'onduleur avec la tension du réseau est classiquement assurée par la boucle verrouillé de phase (largement connue par "Phase Locked Loop" PLL). Cette dernière génère un angle  $\theta$  égale à celui du réseau électrique.

Le diagramme de la commande en boucle fermée du système globale d'injection de l'énergie photovoltaïque au réseau électrique triphasé et illustré à la figure suivante :

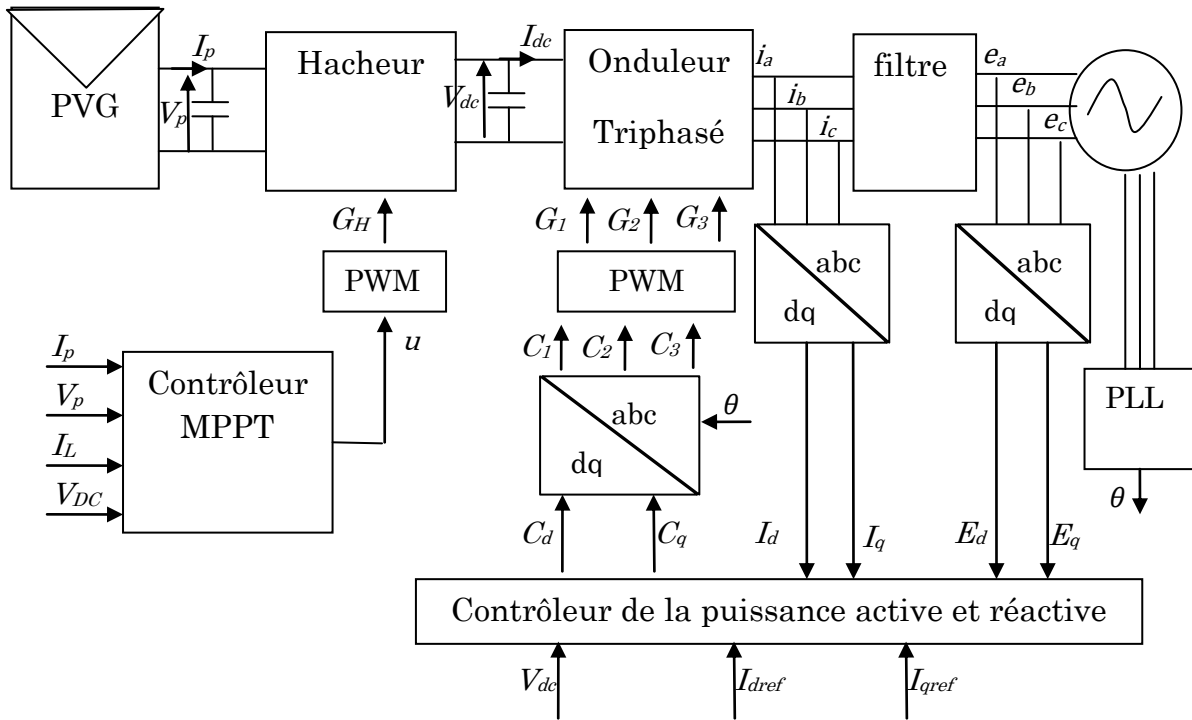


Figure 5.7 : schéma bloqué de commande du système photovoltaïque à base d'un hacheur et d'un onduleur triphasé.

### 2.2.2.1. Commande MPPT par mode glissant

L'objectif est d'établir une loi de commande qui fait tendre  $y_1 = \frac{\partial P}{\partial V_p} = I_p + V_p \frac{\partial I_p}{\partial V_p}$  vers zéro en temps fini. Ainsi, on identifie l'erreur de poursuite de la forme suivante :

$$\varepsilon_p = y_1 - y_{1ref} \quad (5.30)$$

Avec  $y_{1ref} = \frac{\partial P_{MPP}}{\partial V_{MPP}} = 0$

La première dérivée de  $\varepsilon_1$  donne :

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\partial V_p}{\partial t} \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right) \quad (5.31)$$

$$\ddot{\varepsilon}_p = \frac{\partial^2 V_p}{\partial t^2} \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right) + \left( \frac{\partial V_p}{\partial t} \right)^2 \left( 3 \times \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} + V_p \frac{\partial^3 I_p}{\partial V_p^3} \right) \quad (5.32)$$

Avec  $\frac{\partial^2 V_p}{\partial t^2} = \frac{1}{c_p} \left( \frac{\partial I_p}{\partial V_p} \frac{\partial V_p}{\partial t} - \frac{1}{L} (V_p - V_{dc}) \right) - \frac{V_{dc}}{c_p L} u$

$\ddot{\varepsilon}_p$  peut être écrite sous la forme  $\ddot{\varepsilon}_p = f + gu$

$$\text{Avec } f = \frac{1}{c_p} \left( \frac{\partial I_p}{\partial V_p} \frac{\partial V_p}{\partial t} - \frac{1}{L} (V_p - 1) \right) \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right) + \left( \frac{\partial V_p}{\partial t} \right)^2 \left( 3 \times \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} + V_p \frac{\partial^3 I_p}{\partial V_p^3} \right)$$

$$\text{Et } g = -\frac{V_{dc}}{LC_p} \left( 2 \times \frac{\partial I_p}{\partial V_p} + V_p \frac{\partial^2 I_p}{\partial V_p^2} \right)$$

Le terme de commande  $u$  apparait explicitement après deux dérivations de l'erreur  $\varepsilon_1$ . On résulte que le degré relatif est  $r_p = 2$ . On définit donc la surface de glissement sous la forme suivante :

$$s_p = \dot{\varepsilon}_p + k_1 \varepsilon_p \quad (5.33)$$

Lorsque le système est sur la surface de glissement, la dérivée de cette surface est nulle, on obtiendra donc :

$$\dot{s}_p = \ddot{\varepsilon}_p + k_1 \dot{\varepsilon}_p = 0 \quad (5.34)$$

A ce stade la commande de commutation, qui fait partie de la commande par mode glissant, est nulle. On résulte que la commande par mode glissant vaut la commande équivalente. On aura donc :

$$f + g u_{p-eq} + k_p \dot{\varepsilon}_p = 0 \quad (5.35)$$

Alors :

$$u_{equivalente} = -\frac{1}{g} (f + k_1 \dot{\varepsilon}_p) \quad (5.36)$$

La commande par commutation est :

$$u_{sign} = -\frac{k_{11}}{g} \text{sign}(s_p) \quad (5.37)$$

Finalement, la commande par mode glissant est la somme des deux commandes :

$$u_{SMC} = -\frac{1}{g} (f + k_p \dot{\varepsilon}_p + k_{p1} \text{sign}(s_p)) \quad (5.38)$$

### 2.2.2.2. Commande du facteur de puissance par mode glissant

La commande du facteur de puissance est réalisée en tendant le courant  $I_q$  vers  $I_{qref} = 0$ . Egalement, cette commande doit assure la convergence de la puissance active vers sa puissance maximale. On suppose que les interrupteurs sont idéals, la référence de puissance active maximale est égale à la puissance générée du photovoltaïque. On aura donc :

$$i_{dref} = \frac{2 P_{max}}{3 E_d} \quad \text{et} \quad i_{qref} = 0 \quad (5.39)$$

$$\varepsilon_q = i_q - i_{qref} = i_q \quad (5.40)$$

$$\varepsilon_d = i_d - i_{dref} \quad (5.41)$$

Les dérivées de ces erreurs sont :

$$\dot{\varepsilon}_q = \frac{\partial I_q}{\partial t} = -wi_d - \frac{r}{L_f} i_q - \frac{1}{L_f} E_q + \frac{V_{dc}}{L_f} C_q \quad (5.42)$$

$$\dot{\varepsilon}_d = \frac{\partial I_d}{\partial t} = -wi_d - \frac{r}{L_f} i_q - \frac{1}{L_f} E_q + \frac{V_{dc}}{L_f} C_d - \frac{\partial I_{dref}}{\partial t} \quad (5.43)$$

$$\text{Avec } \frac{\partial I_{dref}}{\partial t} = \frac{2}{3E_d} \left( \frac{\partial I_p}{\partial V_p} \frac{\partial V_p}{\partial t} V_p - \frac{\partial V_p}{\partial t} I_p \right)$$

Le terme de commande  $C_q$  et  $C_d$  apparaissent dès la première dérivée. Les degrés relatifs sont donc unitaires  $r_q = 1$  et  $r_d = 1$ . Les surfaces de glissement seront les erreurs eux-mêmes :

$$s_q = \varepsilon_q \text{ et } s_d = \varepsilon_d \quad (5.44)$$

Les commandes équivalentes sont tirées lorsque le système fonctionne sur les surfaces de glissement.

$$\dot{s}_q = \dot{\varepsilon}_q = -wi_d - \frac{r}{L_f} i_q - \frac{1}{L_f} E_q + \frac{V_{dc}}{L_f} C_{q-eq} = 0 \quad (5.45)$$

$$\dot{s}_d = \dot{\varepsilon}_d = wi_d - \frac{r}{L_f} i_q - \frac{1}{L_f} E_d + \frac{V_{dc}}{L_f} C_{d-eq} - \frac{\partial I_{dref}}{\partial t} = 0 \quad (5.46)$$

D'où :

$$C_{q-eq} = \frac{1}{V_{dc}} (L_f wi_d + r i_q + E_q) \quad (5.47)$$

$$C_{d-eq} = \frac{1}{V_{dc}} \left( -L_f wi_q + r i_d + E_d + \frac{\partial I_{dref}}{\partial t} \right) \quad (5.48)$$

Les commande d'interruption sont données par :

$$C_{q-sign} = \frac{-k_q}{V_{dc}} \text{sign}(i_q) \quad (5.49)$$

$$C_{d-sign} = \frac{-k_d}{V_{dc}} \text{sign}(i_d) \quad (5.50)$$

La synthèse de la commande par mode glissant de la puissance active (maximisation) et de la puissance réactive(annulation) se déduit comme suite :

$$C_q = C_{q-sign} + C_{q-eq} \quad (5.51)$$

$$C_d = C_{d-sign} + C_{d-eq} \quad (5.52)$$

Finalement, l'application de ces deux commandes va forcer le système à injecter toute la puissance disponible issue du hacheur avec un facteur de puissance nul quel que soit les conditions climatiques. La section suivante, va montrer les performances de cette commande par mode glissant sur un système d'injection de l'énergie photovoltaïque au réseau triphasé.

### 2.2.3. Résultats de simulation

La simulation est faite dans l'environnement Simulink. Le système est testé dans différentes irradiations. La simulation commence par à une valeur d'éclairement de 1000 Watt/m<sup>2</sup>. Après 20 seconde de fonctionnement, l'éclairement change à 1200 watt/m<sup>2</sup>. L'éclairement devient 800 watt/m<sup>2</sup> après 40 secondes de fonctionnement (figure 5.8).

L'énergie produite est proportionnelle à l'éclairement solaire (tenant température constante). Cependant la tension au borne de l'onduleur doit rester égale à celle du réseau en terme d'amplitude (tension efficace d'une seul phase égale à 220) et de fréquence (50Hz). Par ailleurs, le courant triphasé injecté à ce réseau, proportionnellement à l'éclairement, doit demeurer en phase avec cette tension. La figure 5.9 représente l'intensité et la tension à la sortie de l'onduleur. La figure 5.10, représente un agrandissement sur la figure 5.9 pour observer le déphasage. La figure 5.11, présente le courant qui circules dans une seul phase.

En fin la puissance active et réactive sont présentée sur la figure 5.12, Cette figure montre que la puissance réactive échangée est nulle, tandis que la puissance active change proportionnellement à l'éclairement.

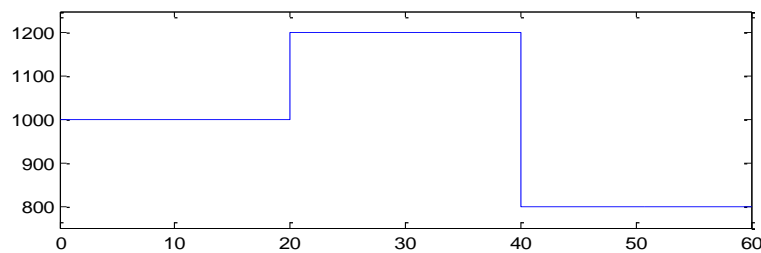


Figure 5.8 : éclairement solaire utilisé au test

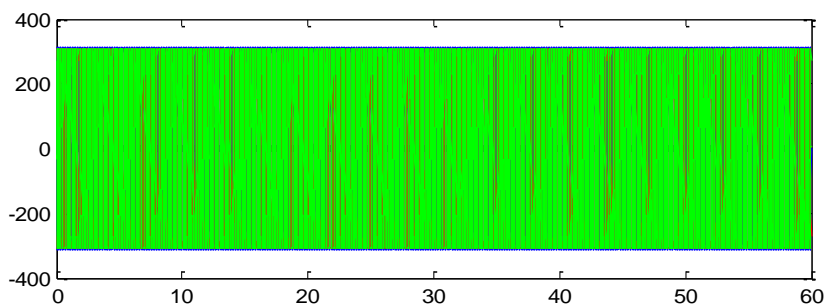


Figure 5.9 : Tension et courant à la sortie de l'onduleur

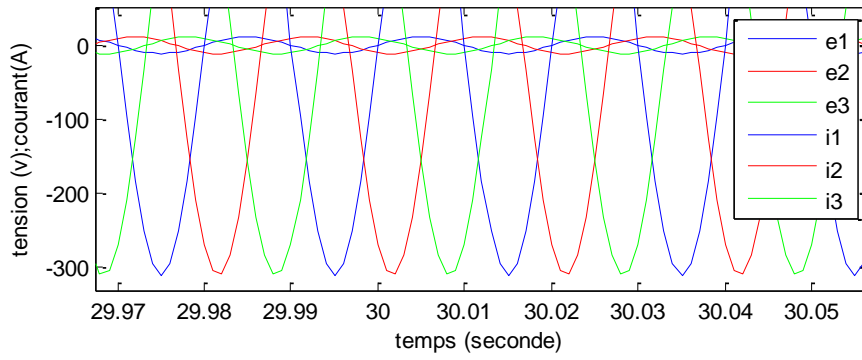


Figure 5.10 : Zoom sur la figure 5.9 ; le courant injecté est phase avec la tension du réseau électrique.

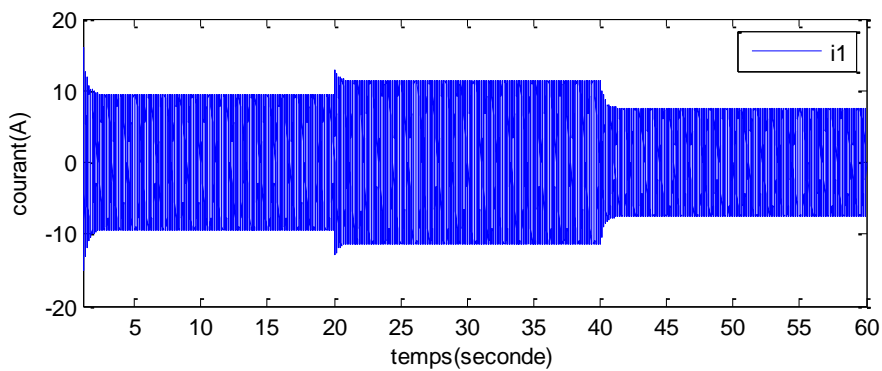


Figure 5.11 : Courant dans une seule phase

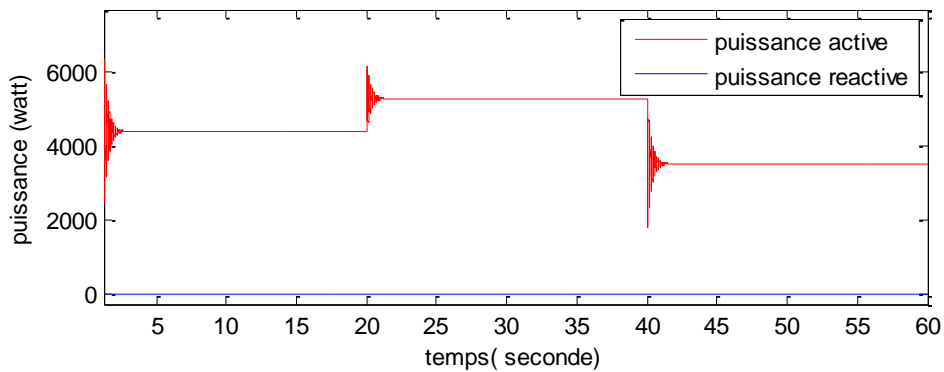


Figure 5.12 : Puissance active injectée au réseau et puissance réactive

### Résultats

Dans ce passage, un système photovoltaïque a donné naissance à un réseau triphasé qui servira comme plateforme pour recevoir d'autres énergies. Ces dernières doivent respecter les caractéristiques de ce réseau en termes de tension et du déphasage, avant d'être exploitées localement ou injectées sur le réseau national. On pense que l'énergie éolienne et hydrolienne présente une certaine complémentarité pour l'énergie solaire (aux moments de l'éclairement

nulle). D'où la naissance d'un système hybride permettant un taux respectable en terme de durabilité. Le prochain passage, va focaliser sur la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Cette étude demeure valable avec peu de changement sur la mécanique de la turbine pour l'hydrolienne

### 3. Energie éolienne/hydrolienne injectée au réseau électrique

Ce qui dit machine asynchrone à double alimentation dit prix bas et rendement limité. En revanche, la machine synchrone à aimant permanent à nos jours est une machine presque complète. On peut dire une éolienne du futur: rendement élevé, champs de fonctionnement presque plein échelle, maintenance relativement réduite (absence de balais), prix peu élevé mais amortis vue ses avantages techniques.

Dans cette partie, on va procéder à la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent. Cette modélisation couvrira la turbine éolienne, le redresseur commandé, l'onduleur et le réseau électrique. Ainsi, différentes commandes vont être établies pour le but de faire fonctionner le système entier d'une manière optimale.

Bien qu'il prend plusieurs formes hydrodynamiques, La structure électrique de l'hydrolienne est la même que celle de l'éolienne. Les commandes appliquées sur les éoliennes sont souvent adéquates pour les hydroliennes. L'intégration de cette dernière vient principalement pour la compensation énergétique assurant une grande autonomie à notre système hybride.

#### 3.1. Modélisation d'un système éolien

Le schéma global du système de conversion de l'énergie éolienne est présentée à la figure 5.13, elle est constituée d'une turbine dont l'arbre est fixé au rotor de la machine synchrone à aimant permanent. Les enroulement satoriques de cette dernière sont connectés à un redresseur qui transforme l'énergie alternative issue du générateur en une énergie continue. Ensuite un onduleur permet de retransformer cette énergie continue en une énergie alternative adéquate aux exigences du réseau triphasé.

##### 3.1.1. Modélisation de la turbine éolienne

La performance de chaque turbine éolienne est caractérisée par un coefficient de puissance  $C_p$ . Ce coefficient reflète le taux de conversion de la puissance dans le courant d'air ( $P_v$ ) en une puissance mécanique de rotation (puissance absorbé  $P_a$ ).

$$C_p = \frac{P_a}{P_v} \quad (5.53)$$

$P_V$  étant la puissance d'un courant d'air qui traverse une surface  $S = \pi R^2$  ( $R$  est le rayon de la turbine éolienne). Cette puissance peut être établie par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \tag{5.54}$$

Avec  $V$  denote la vitesse du vent et  $\rho$  la densité d'air en  $Kg/m^2$ . La puissance aérodynamique instantanée transmise sur l'arbre du rotor est exprimée par :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) V^3 \tag{5.55}$$

Le coefficient de puissance dépend principalement de l'angle de calage de la turbine qu'on va considérer nul dans ce chapitre ( $\beta = 0$ ), et du paramètre  $\lambda = \frac{\omega_r R}{V}$ . On peut exprimer la puissance aérodynamique comme le quotient de la vitesse de rotation de la turbine et le couple sur son arbre :

$$P_a = T_a \omega_r \tag{5.56}$$

On aura finalement l'expression du couple aérodynamique sous la forme suivante :

$$T_a = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta) V^2 \tag{5.57}$$

L'équation différentielle mécanique modélisant le couple aérodynamique et le couple électromagnétique résistant  $T_g$  est donnée par :

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - K_r \omega_r - T_g \tag{5.58}$$

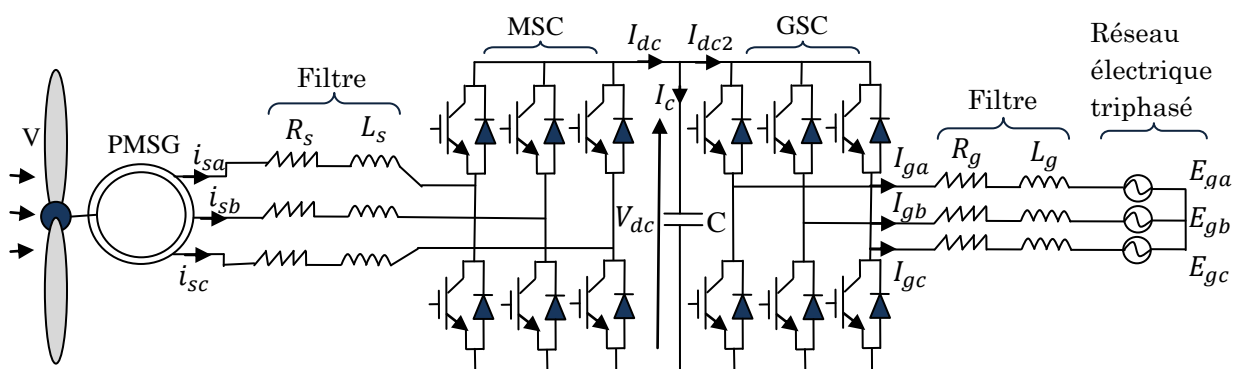


Figure 5.13 : Schéma électrique d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent.

Avec  $J_r$  est le moment d'inertie et  $K_r$  est le facteur de friction. La figure 5.14 illustre un modèle mécanique de la turbine éolienne étudiée (turbine éolienne à une seule masse).

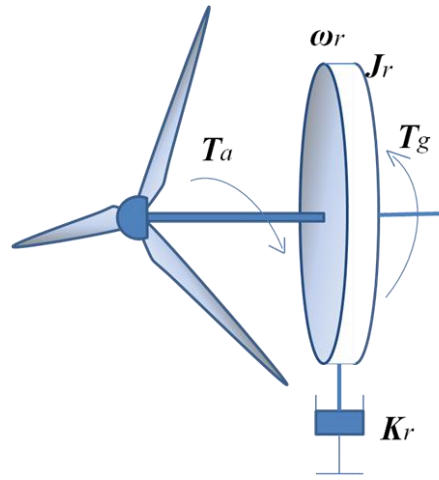


Figure 5.14 :Turbine éolienne à une seul masse

### 3.1.2. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

Le modèle dynamique de la machine synchrone à aimant permanent à la référence dq est présenté sous la forme suivante :

$$\begin{cases} dI_{sd} = -\frac{r}{L_d} I_{sd} + \frac{L_q}{L_d} p\omega_r I_{sq} + \frac{1}{L_d} V_{sd} \\ dI_{sq} = -\frac{r}{L_q} I_{sq} + \frac{L_d}{L_q} p\omega_r I_{sd} - \frac{1}{L_q} p\omega_r \phi_v + \frac{1}{L_q} V_{sq} \end{cases} \quad (5.59)$$

Avec  $r$  est la résistance des enroulements satoriques.  $L_d$  et  $L_q$  sont respectivement les composantes d et q de l'inductance satoriques. On considère que  $L_d$  et  $L_q$  sont égaux.  $p$  est le nombre de pôles.  $\phi_v$  est le flux magnétique permanent.  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  sont respectivement le courant direct et le courant de quadrature.  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  sont respectivement la tension direct et la tension de quadrature.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_g = p\phi_v i_{sq} \quad (5.60)$$

### 3.1.3. Modèle de l'onduleur (convertisseur coté réseau)

Le modèle de l'onduleur connecté au réseau peut être exprimé par :

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{R_g}{L_g} I_d + \omega_g I_q - \frac{E_d}{L_g} + \frac{V_{dc}}{L_g} K_d \\ \dot{i}_q = -\omega_g I_d - \frac{R_g}{L_g} I_q - \frac{E_q}{L_g} + \frac{V_{dc}}{L_g} K_q \end{cases} \quad (5.61)$$

$K_d, K_q$  sont respectivement la commande direct et de quadrature de l'onduleur.  $E_d$  et  $E_q$  , sont respectivement la tension direct et de quadrature du réseau.  $I_d$  et  $I_q$  , sont respectivement le

courant direct et de quadrature du réseau.  $L_g$  est l'inductance du filtre à l'entrée du réseau. Sa résistance interne est  $R_g$ .  $\omega_g$  est la fréquence du réseau.

### 3.2. Commande du système éolien

#### 3.2.1. Commande du couple électromagnétique

Pour chaque vitesse du vent, il existe une seule vitesse de rotation optimale notée  $\omega_{r-ref}$  où l'éolienne peut générer une puissance maximale. Pour forcer l'éolienne à fonctionner à cette vitesse on doit commander le couple électromagnétique résistant  $T_g$ .

On définit  $e$  l'erreur de poursuite de la vitesse de rotation optimale comme :

$$e = \omega_r - \omega_{r-ref} \quad (5.62)$$

Avec  $\omega_{r-ref} = \lambda_{opt} \cdot \frac{V}{R}$

La dérivée de l'erreur donne :

$$\dot{e} = \dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{r-ref} = \frac{1}{J_r} (T_a - K_r \omega_r - T_g) - \lambda_{opt} \cdot \frac{V}{R} \quad (5.63)$$

Le terme de commande est apparu dès la première dérivée. Le degré relatif du système vaut  $r=1$ . La surface de glissement est établie comme étant l'erreur de poursuite:

$$s_{\omega_r} = e \quad (5.64)$$

La commande équivalente est obtenue quand le système est sur la surface de glissement. A ce moment cette surface et sa dérivée deviennent nulles :

$$s_{\omega_r} = 0 \text{ et } \dot{s}_{\omega_r} = 0 \quad (5.65)$$

On aura donc :

$$T_{g\_equivalent} = T_a - K_r \omega_r - J_r \dot{\omega}_{r-ref} \quad (5.66)$$

La commande par commutation est :

$$T_{g\_sign} = K_{\omega_r} \cdot \text{sign}(S_{\omega_r}) \quad (5.67)$$

$K_{\omega_r}$  est une constante positive choisie prudemment pour compenser les incertitudes de mesure d'une part, et pour éviter le phénomène de réticences d'autre part. La commande par mode glissant est une combinaison entre la partie équivalente et de commutation  $T_{g-SMC} = T_{g\_equivalent} + T_{g\_sign}$ . On obtiendra l'expression de la commande finale :

$$T_{g-SMC} = T_a - K_r \omega_r - J_r d\omega_{r\_ref} + K_{\omega_r} \cdot \text{sign}(S_{\omega_r}) \quad (5.68)$$

### 3.2.2. Commande de la machine synchrone à aimant permanent

La commande du générateur se fait à travers les voltages ( $V_{sd}, V_{sq}$ ). L'objectif de cette commande est de faire tendre les courants ( $I_{sd}, I_{sq}$ ) vers ses valeurs de références ( $I_{sd-ref}, I_{sq-ref}$ ).

On définit l'erreur de poursuite comme :

$$e_{isd} = I_{sd} - I_{sd-ref} \quad (5.69)$$

La première dérivée de l'erreur permet de faire apparaître le terme de commande d'une manière explicite :

$$\dot{e}_{isd} = \dot{I}_{sd} - \dot{I}_{sd-ref} \quad (5.70)$$

Avec  $\dot{I}_{sd-ref} = 0$

Alors la surface de glissement est égale à l'erreur de poursuite :

$$S_d = e_{isd} \quad (5.71)$$

La commande par mode glissant est :

$$V_{sd} = V_{sd\_eq} + V_{sd\_sign} = r_{isd} - L_q p \omega_r i_{sq} + K_{Vsd} \cdot \text{sign}(S_d) \quad (5.72)$$

Avec :  $\begin{cases} V_{sd\_eq} = r_{isd} - L_q p \omega_r i_{sq} \\ V_{sd\_sign} = K_{Vsd} \cdot \text{sign}(S_d) \end{cases}$

De même on définit la deuxième tension de commande  $V_{sq}$  :

$$V_{sq} = V_{sq\_eq} + V_{sq\_sign} \quad (5.73)$$

Cette fois, la référence optimale à poursuivre est :

$$i_{sq-ref} = p \phi_v / T_{g-SMC} \quad (5.74)$$

L'erreur de poursuite et sa dérivée première sont définies par :

$$e_{isq} = I_{sq} - I_{sq-ref} \quad (5.75)$$

$$\dot{e}_{isq} = \dot{I}_{sq} - \dot{I}_{sq-ref} = -\frac{r}{L_q} I_{sq} + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r I_{sd} - \frac{1}{L_q} p \omega_r \phi_v + \frac{1}{L_q} V_{sq} - \dot{I}_{sq-ref} \quad (5.76)$$

Le terme de commande apparait explicitement dès la première dérivée. La surface de glissement est donc égale à l'erreur ( $S_q = e_{isq}$ ). Les termes de la commande équivalente et de commutation se résultent comme suite:

$$\begin{cases} V_{sq\_eq} = rI_{sq} - L_d p\omega_r I_{sd} + p\omega_r \phi_v + L_q \dot{I}_{sq-ref} \\ V_{sq-sign} = K_{Vsq} \cdot sign(S_q) \end{cases} \quad (5.77)$$

L'expression finale de la commande par mode glissant de la machine synchrone à aimant permanent est la suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = r i_{sd} - L_q p\omega_r i_{sq} + K_{Vsd} \cdot sign(S_d) \\ V_{sq} = r I_{sq} - L_d p\omega_r I_{sd} + p\omega_r \phi_v + L_q \dot{I}_{sq-ref} + K_{Vsq} \cdot sign(S_q) \end{cases} \quad (5.78)$$

Cette commande est appliquée sur la machine synchrone par le biais du redresseur commandé. A partir des tensions  $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$  on peut tirer les commandes des thyristors.

### 3.2.3. Commande du convertisseur coté machine

Les tensions générées par la machine synchrone dans le repère normal sont donnée par :

$$V = R_s I + L_s dI + U_s \quad (5.79)$$

Avec:

$V = [V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}]^T$  ; les tensions simples des phases du générateur;

$I = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  ; les courants qui circulent dans les enroulements statoriques;

$U_s = [U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}]^T$  ; les tensions à l'entrée de l'onduleur ;

$L_s$  et  $R_s$  sont respectivement l'inductance du filtre d'entrée et sa résistance interne.

Les tensions à l'entrée de l'onduleur peuvent être exprimées par rapport à la tension du bus continu sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_b \\ \omega_c \end{bmatrix} V_{dc}$$

Avec  $\begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_b \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$  est la matrice de commande du redresseur et  $[S_a, S_b, S_c]^T$  est le vecteur des états des interrupteurs.

On peut tirer  $[\omega_a, \omega_b, \omega_c]^T$  comme suit:

$$\begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_b \\ \omega_c \end{bmatrix} = \frac{3}{V_{dc}} \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (5.80)$$

La tension du bus continu est exprimée :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) - I_{dc2} \quad (5.81)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{3C} (\omega_a i_{sa} + \omega_b i_{sb} + \omega_c i_{sc}) - \frac{1}{C} I_{dc2} \quad (5.82)$$

### 3.2.4. Commande du convertisseur coté réseau (onduleur)

On considère un réseau électriques triphasé caractérisé par :

$$\begin{cases} E_{ga} = \sqrt{2}V_{eff} \cdot \sin(\omega_g t) \\ E_{gb} = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega_g t - \phi) \\ E_{gc} = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega_g t + \phi) \end{cases} \quad (5.83)$$

La transformation de park des ces tensions simples est :

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \\ E_0 \end{bmatrix} = T_{abc}^{dq0} \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix} \quad (5.84)$$

Les courants injectés au réseau peuvent être exprimés sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{I}_d = -\frac{R_g}{L_g} I_d + \omega_g I_q - \frac{E_d}{L_g} + \frac{V_{dc}}{L_g} K_d \\ \dot{I}_q = -\omega_g I_d - \frac{R_g}{L_g} I_q - \frac{E_q}{L_g} + \frac{V_{dc}}{L_g} K_q \end{cases} \quad (5.85)$$

Avec  $K_d$  ; variable de commande direct de l'onduleur.  $K_q$  ; variables de commande de quadrature.  $I_d$  est le courant direct injecté au réseau et  $I_q$  est le courant de quadrature.  $\omega_g$  pulsation angulaire du réseau.  $E_d$  et  $E_q$  sont respectivement la tension direct et la tension de quadrature du réseau.  $L_g$  et  $R_g$  sont respectivement l'inductance et sa résistance interne du filtre en aval de l'onduleur.

On définit l'erreur de poursuite du courant directe et sa dérivée, ainsi que celles du courants de quadrature :

$$\begin{cases} e_d = I_d - I_{d-ref} \\ \dot{e}_d = \dot{I}_d - \dot{I}_{d-ref} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} e_q = I_q - I_{q-ref} \\ \dot{e}_q = \dot{I}_q - \dot{I}_{q-ref} \end{cases} \quad (5.86)$$

Le termes de commande apparaissent avec la première dérivée. On définit les surfaces de glissement et ses dérivées :

$$\begin{cases} s_d = e_d \\ \dot{s}_d = \dot{e}_d \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} s_q = e_q \\ \dot{s}_q = \dot{e}_q \end{cases} \quad (5.87)$$

Les commandes équivalentes seront donc exprimées comme suite :

$$\begin{cases} K_{d\_eq} = \frac{L_g}{V_{dc}} \left[ \frac{R_g}{L_g} I_d - \omega_2 I_q + \frac{E_d}{L_g} \right] \\ K_{q\_eq} = \frac{L_g}{V_{dc}} \left[ \frac{R_g}{L_g} I_q + \omega_2 I_d + \frac{E_q}{L_g} \right] \end{cases} \quad (5.88)$$

Les commandes de commutation :

$$\begin{cases} K_{d\_sign} = K_{d1} \cdot \text{sign}(S_d) \\ K_{q\_sign} = K_{q1} \cdot \text{sign}(S_q) \end{cases} \quad (5.89)$$

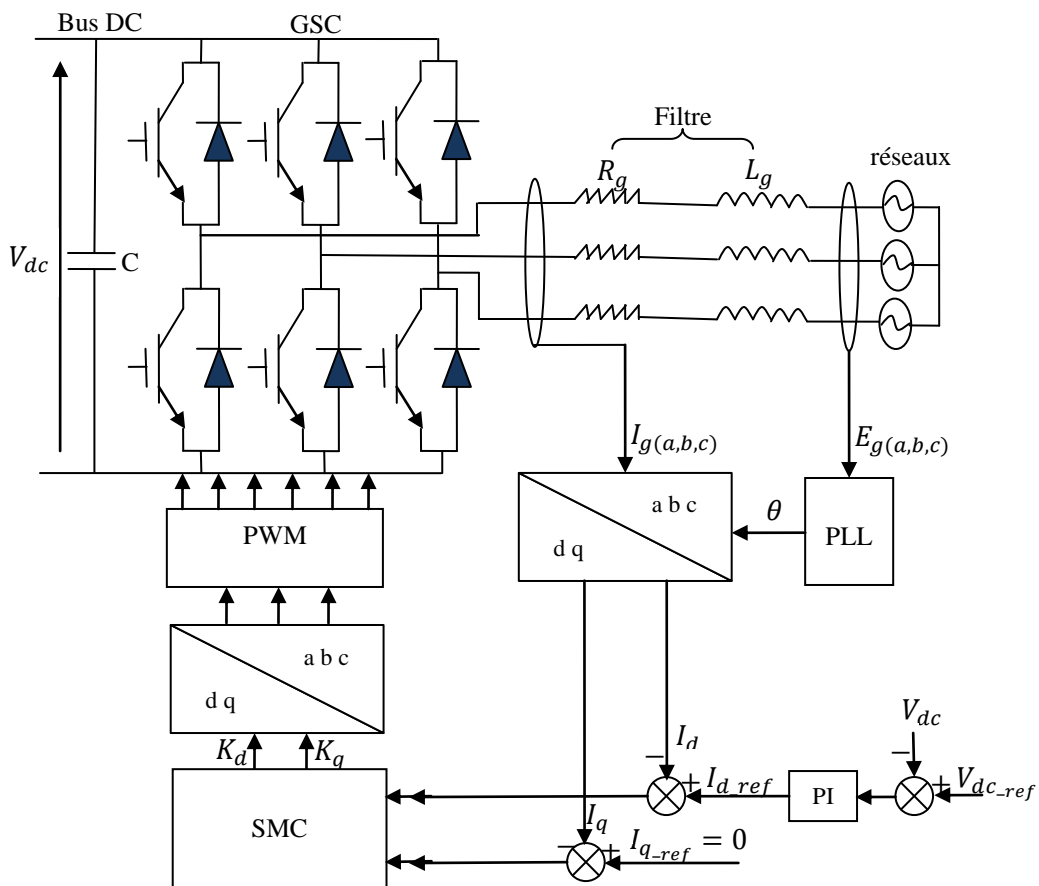


Figure 5.15 : Structure schématique de commande de l'onduleur

Les termes de commande par mode glissant résultants :

$$\begin{cases} K_d = \frac{L_g}{V_{dc}} \left[ \frac{R_g}{L_g} I_d - \omega_2 I_q + \frac{E_d}{L_g} \right] + K_{d1} \cdot \text{sign}(S_d) \\ K_q = \frac{L_g}{V_{dc}} \left[ \omega_2 I_d + \frac{R_g}{L_g} I_q + \frac{E_q}{L_g} \right] + K_{q1} \cdot \text{sign}(S_q) \end{cases} \quad (5.90)$$

La figure 5.15 montre le schéma de commande de l'onduleur. On remarque l'existence de différentes unités à savoir ; l'unité de transformation de Park qui assure la conversion des grandeurs alternatives triphasées aux grandeurs continues en éliminant la variable du temps. La communication entre le software et le hardware est réalisée par le biais d'un dispositif électronique nommer modulateur de la largeur d'impulsion MLI. Ce dispositif est largement connu par la nomination en anglais "pulse width modulator PWM". A partir de différentes références et mesures, les algorithmes de commande peuvent générer des décisions suivant une loi de commande bien adoptée pour accomplir une tâche. Cette dernière attaque le processus pour mener le système énergétique à opérer d'une manière optimale

### 3.2.5. Boucle fermée de synchronisation de phase

La régulation de phase se fait classiquement par un régulateur PI. Lors de l'injection au réseau électrique, le voltage à la sortie de l'onduleur doit être synchronisé à la fréquence de ce réseau. Ce processus est largement connue par "phase locked loop (PLL)". Il est illustré dans la figure 5.16.

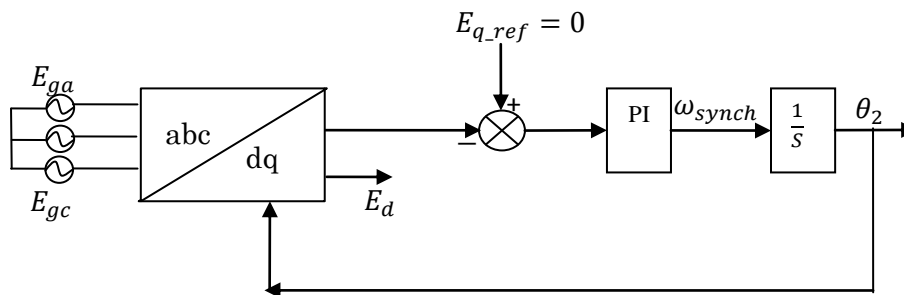


Figure 5.16 : topologie du régulateur PPL

### 3.3. Résultats de simulation

La simulation est faite dans l'environnement Simulink. Le système éolien est testé dans différentes vitesses de vent. La simulation commence par une valeur du vent de 12 m/s. Après 4 secondes de fonctionnement, la vitesse change à 14 m/s. La vitesse revient 10 m/s après 8 secondes de fonctionnement (figure 5.17).

L'énergie produite dépend uniquement de la vitesse du vent qui ne cesse de changer. Cependant la tension aux bornes de l'onduleur doit demeurer égale à celle du réseau en terme d'amplitude (tension efficace égale à 380) et de fréquence (50Hz). Par ailleurs, le courant triphasé injecté à ce réseau, qui ne dépend que de la vitesse du vent, doit demeurer en phase avec cette tension. La

figure 5.18 représente l'intensité et la tension à la sortie de l'onduleur. La figure 5.19, représente un agrandissement sur la figure 5.19 pour observer le déphasage. La figure 5.20, présente le courant qui circules dans une seul phase.

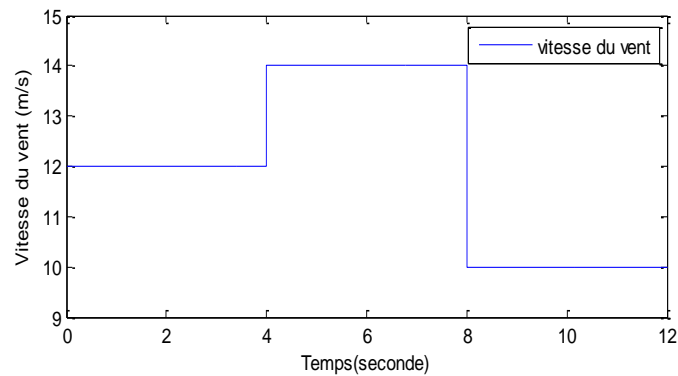


Figure 5.17: Profile du vent pour le teste

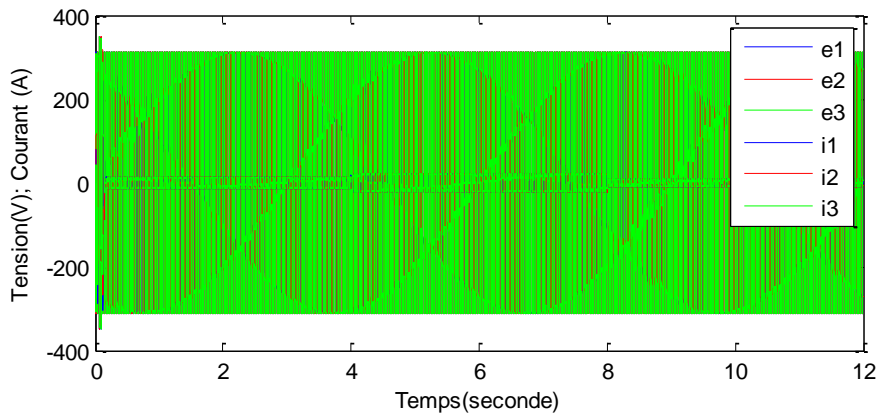


Figure 5.18 : Tensions et courants observés à la sortie de l'onduleur ; les tensions sont fixées à  $220\sqrt{2}$  volts tandis que les courants changent d'amplitude(visible de près après agrandissement).

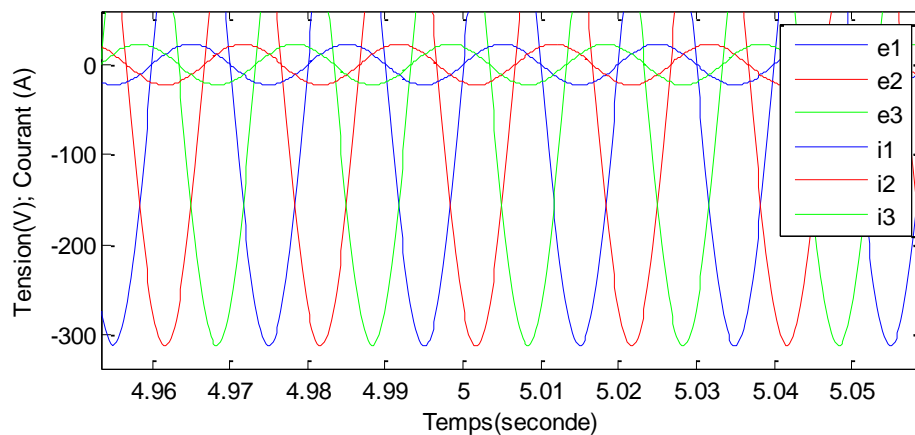


Figure 5.19 : zoom sur la figure 5.18 ; les courant sont en phase avec les tensions du réseau.

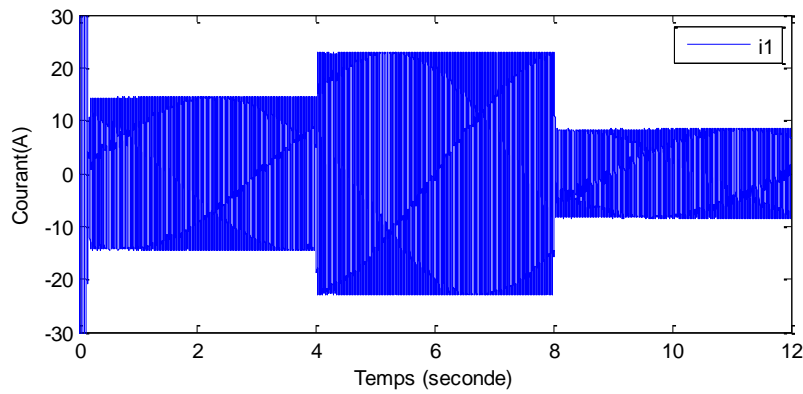


Figure 5.20 : les intensités suivent les changements du vent.

#### 4. hybridation des sources énergétiques renouvelables

Dans certaines régions du Maroc, l'hybridation de ces trois énergies est réalisable (disponibilité du soleil, courant d'air et courant d'eau). Bien que ces sources d'énergie présentent des qualités promotionnelles, la recherche durable est encourageante. Il suffit de bien déguiser les outils de recherches (machines d'extraction). La technologie actuelle est nuance à la prospérité de cette énergie propre. Tous les scientifiques qui s'occupent des changements climatiques terrestres encouragent et exigent l'exploitation des technologies renouvelables récentes pour abolir progressivement les énergies à base de sources fossiles. C'est un atout pour les pays qui sont dépourvus d'énergies des sources fossiles, et c'est un bon signe pour le développement en énergie pour notre pays qui est le Maroc.

Dans ce contexte, on a pu créer un micro réseau où les trois énergies citées auparavant sont l'ossature de notre recherche. Grâce aux commandes utilisées, les systèmes de production injectent une énergie propre tout en respectant les caractéristiques de ce micro réseau. Nous obtenons en fin un schéma global d'un système hybride réalisant un niveau respecté d'autonomie, comme la montre la figure 5.21.

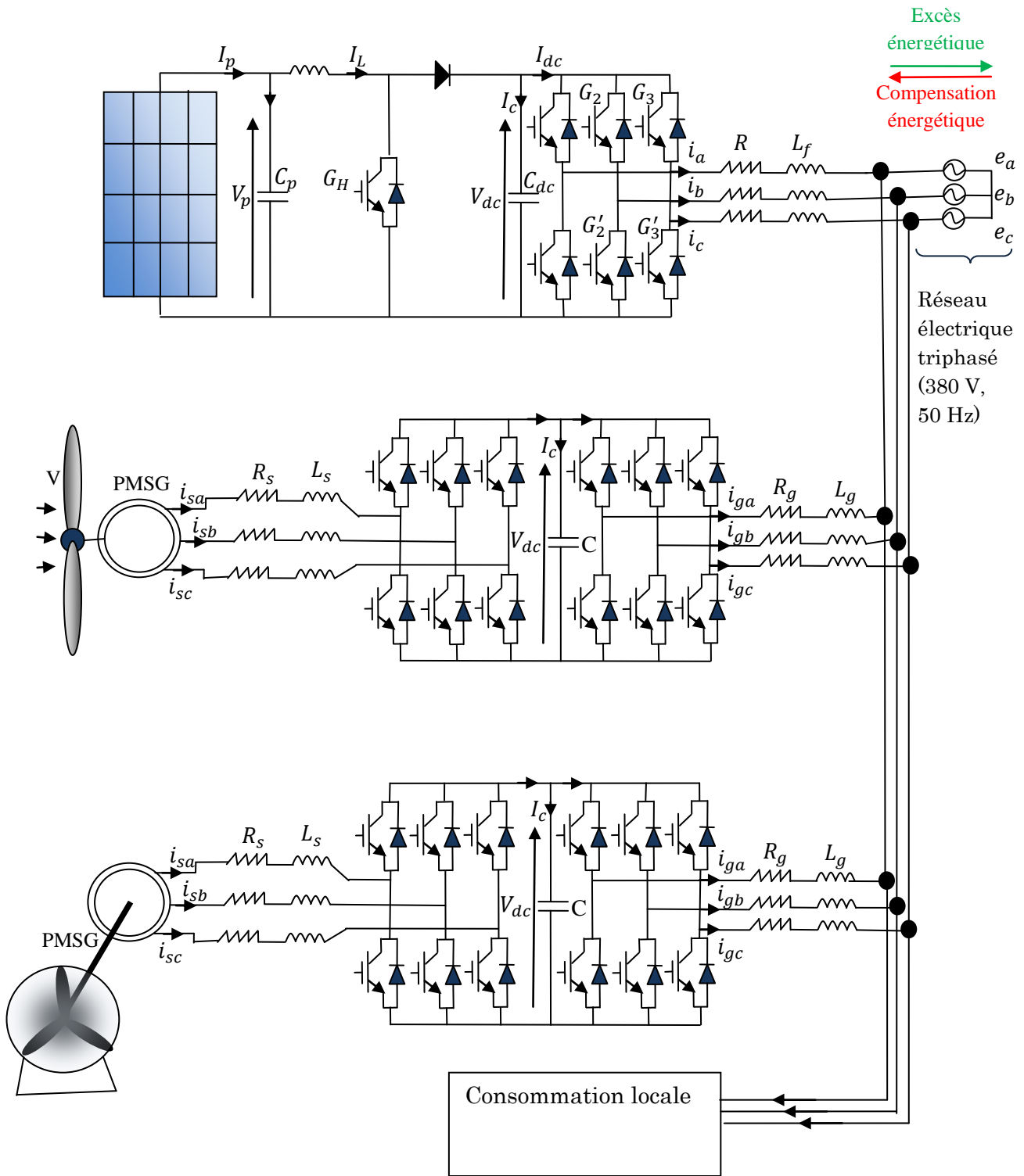


Figure 5.21 : réseau électrique résultant

### 5. Conclusion et perspective de la commande par SVM

Il est remarqué que les commandes appliquées sur ces différents systèmes de production énergétique sont à base du mode glissant. On remarque aussi que ces commandes par mode glissant utilisées dans ce chapitre montre un certain niveau acceptable de stabilité et de convergence, à savoir que les profils testés à la simulation sont théoriques. Cependant, aux

conditions pratiques, ces méthodes présentent plusieurs limitations concernant l'applicabilité, la robustesse et la stabilité. Les travaux futures vont se focaliser sur l'application de la technique SVM sur ces systèmes énergétiques. Cette technique a montrée un succès incontournable en terme de commande des systèmes énergétiques renouvelables dans les chapitres précédents.

Le prochain travail pourra être donc partitionné en différentes étapes. Au chapitre 3, la méthode SVM a pu commander un système photovoltaïque destiné aux applications de pompage d'eau. Le succès marqué sur une telle application va être projeté sur une installation d'injection de l'énergie au réseau électrique triphasé. Pour pouvoir commander cette installation par SVM, on doit modéliser le comportement de la sortie du système (la variable de commande) en fonction de son entrée. Ensuite, on doit établir un contrôleur par SVM. Concernant la commande de l'éolienne et de l'hydrolienne, une relation traduisant le comportement des différentes variables de commande par rapport à l'entrée du système (vitesse du vent pour l'éolienne, vitesse du courant d'eau pour l'hydrolienne) doit être modélisée par la méthode de SVM. Tenant compte des résultats obtenus lors de l'application de la méthode SVM sur une éolienne/hydrolienne à un profile réel (chapitre 4), cette nouvelle technique mérite qu'elle soit testée pour les applications d'injection énergétique aux réseaux électriques.

## Conclusion générale

Les travaux élaborés dans cette thèse se focalisent sur les tâches les plus délicates de la production énergétique. En effet, nous avons proposé plusieurs solutions innovatrices qu'on peut les citer :

**1<sup>er</sup> innovation** : Création d'une nouvelle commande par SVM pour les systèmes de production de l'énergie solaire photovoltaïque.

**Apport 1.1** : Maximisation de l'énergie produite par un système solaire photovoltaïque.

**Apport 1.2** : Stabilisation des système photovoltaïques vis-à-vis les changements climatiques brusques.

**Apport 1.3** : Haute applicabilité de la commande grâce au manque de complexités.

**2<sup>ème</sup> innovation** : Amélioration de la commande par mode glissant pour les systèmes de production de l'énergie photovoltaïque.

**Etape 2.1** : Nous avons utilisé une technique d'intelligence artificielle, dite SVM, pour l'estimation des incertitudes de modélisation ainsi que celles sur les mesures de signaux de capteurs.

**Etape 2.2** : Nous avons inséré le modèle des incertitudes dans le corps de la loi de commande par mode glissant.

**Apport 2.1** : Création d'une commande par mode glissant résistante aux incertitudes.

**3<sup>ème</sup> innovation** : Création d'une nouvelle commande pour les systèmes éoliens par la méthode SVM.

**Etape 3.1** : Nous avons établis un modèle SVM des points de fonctionnement optimale

**Etapes 3.2** : Nous avons employé le modèle SVM pour la génération de la variable de commande pour chaque vitesse du vent.

**Apport 3.1** : Naissance d'une nouvelle stratégie de commande en boucle ouverte, hautement efficace, pratique, aisément implémentée et répond aux exigences du système éolien.

**Apport 3.2** : Temps de réponse très court, d'où ; réaction rapide par rapport au changement des vitesses de vent.

## Conclusion générale

**Apport 3.3** : La première commande destinée pour toute la plage des vitesses du vent (vent faible, normale, fort et violent).

**Apport 3.4** : Extraction énergétique jusqu'à la limite de la technologie de l'éolienne.

**4<sup>ème</sup> innovation** : Conception d'une commande par SVM pour les hydroliennes.

**Etape 4.1** : Nous avons établi un modèle SVM pour l'hydrolienne qui fait lier à chaque vitesse du courant d'eau une valeurs du couple optimal.

**Etape 4.2** : Nous avons inséré le modèle SVM en ligne pour qu'il génère continuellement la variable commande de l'hydrolienne.

**Apport 4.1** : naissance d'une stratégie de commande récente pour les hydroliennes.

**5<sup>ème</sup> innovation (en cours de réalisation)** : Etablissement d'une combinaison plus autonome, comportant trois sources énergétiques renouvelables commandé par SVM.

Ces travaux partagent plusieurs points positifs communs ; on cite la diminution du nombre de capteurs dans le processus de commande d'un système de production de l'énergie renouvelables. Ceci permet une diminution des incertitudes menées par chaque capteur installé, qui peut donner naissance à plusieurs erreurs susceptible de déstabiliser le système. Sans parlé du coût du prix du processus de commande. L'implémentation des stratégies de commande proposées évite les complexités et ramène l'installation énergétique à l'ordinaire (simplicité et efficacité).

Par ailleurs, L'efficacité énergétique dans ces méthodes proposées est prouvée. l'adoption de ces stratégies de commande dans des centrales de plusieurs MW pourra réaliser une véritable économie d'énergie avec une meilleure stabilisation des systèmes de production énergétique.

## Références

- [Abo-11] Abouobaida, H., Cherkaoui, M. and Ouassaid M. (2011) 'Robust maximum power point tracking for photovoltaic cells : A backstepping mode control approach', Multimedia Computing and Systems International Conference, pp. 1-4.
- [Ahm-13] Ahmed R, Namaane A, M'Sir NK. Improvement in perturb and observe method using state flow approach. Energy Procedia 2013;42:614–23.
- [Ass-15] Assareh E, Biglari M. A novel approach to capture the maximum power from variable speed wind turbines using PI controller, RBF neural network and GSA evolutionary algorithm. Renew Sustain Energy Rev 2015;51:1023–37.
- [Ben-07] S. Benelghali, R. Balme, K. Le Saux, M. E. H. Benbouzid, J. F. Charpentier, and F. Hauville, “A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 32, no 4, pp.786-797, Oct. 2007.
- [Ben-10] Seif Eddine Ben Elghali, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Tarek Ahmed-Ali, and Jean Frédéric Charpentier, ‘High-Order Sliding Mode Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator’ IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 35, NO. 2, APRIL 2010
- [Ben-14] Bendib, B., Krim, F., Belmili, H., Almi, M. F. and Boulouma, S., (2014), 'Advanced Fuzzy MPPT Controller for a Stand-alone PV System', Energy Procedia, Vol. 50, pp. 383-392, 2014.
- [Ben-15] Ben Salah, C., Mimouni, M. F. and Ouali, M., (2015) 'A real-time control of photovoltaic water-pumping network', Computers and Electrical Engineering, vol. 46, pp. 14-28.
- [Bou-10] Boukhezzer, B. and Siguerdidjane, H. (2010) ‘Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines’, Control Engineering Practice, Vol. 18, No. 12, pp.1357–1368.
- [Bou-15] El-mahjoub Boufounas, Jaouad Boumhidi and Ismail Boumhidi, “Optimal  $H_{\infty}$  control without reaching phase for a variable speed wind turbine based on fuzzy neural network and APSO algorithm”. Int. J. Modelling, Identification and Control, Vol. 24, No. 2, 2015.
- [Bur-01] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001) Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, ISBN 10: 0471489972.
- [Buy-10] Buyukdegirmenci, V. T., Bazzi, A. M. and Krein, P. T.,(2010), 'A Comparative Study of an Exponential Adaptive Perturb and Observe Algorithm and Ripple Correlation Control for Real-Time Optimization', Control and Modeling for Power Electronics conference. pp. 1-8, 2010.
- [Cav-12] Cavuslu, M.A., Karakuzub, C. and Karakayac, F. (2012) ‘Neural identification of dynamic systems on FPGA with improved PSO learning’, Applied Soft Computing, Vol. 12, No. 9, pp.2707–2718.
- [Cri-00] Cristianini, N. and Shawe-Taylor, J. (2000) ‘An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods’, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

## Bibliographie

- [Dah-15(1)] Omar Dahhani, Bouchra Sefriti, Abdeslam El Jouni & Ismail Boumhidi, 'Maximum power point tracking for a photovoltaic water pumping system with sliding mode control and fuzzy wavelet network' à la conference 'Intelligent systems and computer vision' International IEEE conference, Fez, Morocco march 2015.
- [Dah-15(2)] Omar Dahhani, Abdeslam El Jouni, Bouchra Sefriti, & Ismail Boumhidi, "Optimal perturb and observe control for MPPT based on least square support vector machines algorithm" The 1st IEEE International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV'15), IEEE, Fez-Morocco, 25-26 March 2015.
- [Dah-16(1)] Omar Dahhani, Ismail Boumhidi, Jerry Tekobon, and Cristian Nichita, "Wind power system control based on least square support vector machines algorithms," In the 16th IEEE conference 'Environment and electrical engineering international conference' EEEIC' 16, Florence, Italy, June 2016.
- [Dah-16(2)] Omar Dahhani, Ismail Boumhidi, Ferhat Chabour, and Cristian Nichita, 'Backstepping maximum power point tracking controller for a photovoltaic water pumping system' à la conference 'Energy systems conference 2016: 21st century challenges', Westminster, London, UK.
- [Dah-16(3)] O. Dahhani, B. Sefriti, A. El-Jouni, I. Boumhidi, "Sliding mode control for photovoltaic water pumping system based on support vector machines,". *Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation*, Vol. 8, No. 4, 2016. doi: 10.1504/IJESMS.2016.10000290.
- [Dah-18] O. DAHHANI, A. El-Jouni and I. Boumhidi, "Assessment and control of wind turbine by support vector machines", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 27 (2018) 167–179.
- [Dao-10] A. Daoud and A. Midoun, "Simulation and Experimental Study of Maximum Power Point Tracker Based on a DC/DC Buck Converter", *International Review of Electrical Engineering*, 5 (2) Part A, 514-520, 2010.
- [Elg-12] M. A. Elgendy, B. Zahawi "Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 3, No. 1, January. 2012. doi:10.1109/TSTE.2011.2168245.
- [Elga-12] M. Elgendy, B. Zahawi, and J. Atkinson, "Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications", *IEEE Transactions on suitable energy*, 3 (1), 2012.
- [Fem-13] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo and Massimo Vitelli, "Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems", *International Standard Book Number-13: 978-1-4665-0691-6*.
- [Jou-08] A. El jouni and R. Bachtiri, "A Maximum Power Point Tracking Fuzzy Logic Control for Photovoltaic pumping System", *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 5 (61), 51-57, 2008.

## Bibliographie

- [Hao-14] Hao CHEN, Modeling and Control of a Marine Current Energy Conversion System using a Doubly Salient Permanent Magnet Generator, Université Nantes Angers Le Mans (2014).
- [Haz-14] Hazem Feshara, Mohamed Elharony, Soliman Sharaf, Design, Digital Control, and Simulation of a Grid Connected Photovoltaic Generation System. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.4, No.2, 2014.
- [Gan-14] Ganjefar S, Ghassemi AA, Ahmadi MM. Improving efficiency of two-type maximum power point tracking methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network. *Energy*. 2014;67:444–53.
- [Gri-16] BNEF and Lighting Global (2016), Oš-grid Solar Market Trends Report 2016, commissioned by World Bank Group, Washington, D.C., [www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2016/03/20160301\\_OGridSolarTrendsReport.pdf](http://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2016/03/20160301_OGridSolarTrendsReport.pdf).
- [Kas-12] Kassem, A. M. (2012), 'MPPT control design and performance improvements of a PV generator powered DC motor-pump system based on artificial neural networks', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.43, pp. 90-98.
- [Kja-12] S. B. Kjaer, "Evaluation of the "hill climbing" and the "incremental conductance" maximum power point trackers for photovoltaic power systems," *IEEE trans. Energy Conversion*, vol.27, 922-929, 2012. doi:10.1109/TEC.2012.2218816.
- [Kum-16] Dipesh Kumar and Kalyan Chatterjee, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55 (2016) 957–970.
- [Lev-17] IRENA (2017), *Renewable energy benefits: Leveraging local capacity for onshore wind*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [Lia-08] Jui-Liang, Ding-Tsair Su, Ying-Shing Shiao, Research on MPPT and Single-Stage Grid-Connected for Photovoltaic System, *Wseas Transactions on Systems*, Volume 7, October 2008.
- [Man-02] Manwell, J. F., McGowan, J. G. and Rogers, A. L. (2002) *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, ISBN 10: 0471499722.
- [Mah-12] M. A. Mahmud, "Dynamic Stability of Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System using Zero Dynamic Design Approach", *IEEE Journal of Photovoltaic*, vol. 2, No. 4, pp. 564 - 571, July 2012.
- [Min-14] Cheng Ming, Zhu Ying. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: a review. *Energy Convers Manage* 2014;88:332–47.
- [Moh-15] Mohammad S. Widyan, Modeling, simulations and operational characteristics of a stand-alone hybrid-powered PMDC motor for pumping applications, *International Journal of Power and Energy Systems*, 35(1), 2015.

## Bibliographie

- [Nog-02] T. Noguchi, S. Togashi, R. Nakamoto, "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system," *Indust Electron IEEE Trans*, vol. 49, pp. 217–223, 2002. doi:10.1109/41.982265.
- [Ozk-17] Emre Ozkop and Ismail H. Altas, "Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017), pp. 106–115.
- [Pic-10] D. Picault. Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies. PhD thesis, University of Grenoble, 2010.
- [Pis-17] Pishgar-Komleh S H, Akram A, Evaluation of wind energy potential for different turbine models based on the wind speed data of Zabol region, Iran, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 22 (2017) 34–40.
- [Rad-14] Radjai, T. Rahmani, L. Mekhilef, S. and Gaubert, J. P., (2014), 'Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE', *Solar Energy*, vol. 110, pp. 325-337.
- [Rei-13] A. R. Reisi, M. H. Moradi, S. Jamasb "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review,". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 19, pp. 433–443, 2013. doi:10.1016/j.rser.2012.11.052.
- [Ret-2017] IRENA (2017), *REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [Sah-13] Sahnoun, M. A., Ugalde, H. M. R., Carmona, J. C. and Gomand, J., (2013), 'Maximum Power point Tracking Using P&O Control Optimized by a Neural Network Approach: A Good Compromise between Accuracy and Complexity', *Energy Procedia*, pp 650-659, Vol. 42.
- [Sch-02] Scholkopf, B. and Smola, A. (2002) *Learning with Kernels*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [Sha-04] Shawe-Taylor, J., and Cristianini, N. (2004) *Kernel Methods for Pattern Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Sha-13] M. A. Sahnoun, H. M. R. Ugalde, J. C. Carmona, J. Gomand, "Maximum Power point Tracking Using P&O Control Optimized by a Neural Network Approach: A Good Compromise between Accuracy and Complexity," *Energy Procedia*, pp 650-659, Vol. 42, 2013. doi:10.1016/j.egypro.2013.11.067.
- [Sha-15] Shamshirband S, Tabatabaei M, Aghbashlo M, Yee P L, Petković D, Support vector machine-based exergetic modelling of a DI diesel engine running on biodiesel-diesel blends containing expanded polystyrene, *Applied Thermal Engineering* (2015), <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.10.140>.
- [Suy] Suykens, J. A. K. and Vandewalle, J., (1999), "Least squares support vector machine classifiers," *Neural Process Lett*; 9(3):293–300.

## Bibliographie

- [Tan-97] Tanaka T, Toumiya T. Output control by hill-climbing method for a small scale wind power generating system. *Renew Energy* 1997;12:387–400.
- [Tav-12] Peter Tavner, *Offshore Wind Turbines : Reliability, availability and maintenance*.(2012) Renewable Energy Series 13.
- [Uih-16] Andreas Uihlein and Davide Magagna, “Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58 (2016), pp.1070–1081.
- [Xia-04] W. Xiao, W. G. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems,” In: *Power Electronics Specialists Conference, IEEE 35th Annual*, vol. 3, pp. 1957–1963, 2004. doi:10.1109/PESC.2004.1355417.
- [Yaz-09] Yazdani, A. (2009) ‘A Control Methodology and Characterization of Dynamics for a Photovoltaic (PV) System Interfaced With a Distribution Network’, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 24, No. 3, pp.1538-1551.
- [Yin-15] Yin XX, Lin YG, Li W, Gu YJ, Lei PF, Liu HW. Sliding mode voltage control strategy for capturing maximum wind energy based on fuzzy logic control. *Int J Electr Power Energy Syst* 2015;70:45–51
- [Yu-15] Yu KN, Liao CK. Applying novel fractional order incremental conductance algorithm to design and study the maximum power tracking of small wind power systems. *J Appl Res Technol* 2015;13:238–44.