

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté : Technologie

Département : Electrotechnique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electrique et Haute tension

Par

FATIMA ZOHRA NAAMA

Thème :

Modélisation et Amélioration du Rendement Energétique d'un Système de Conversion d'Energie Eolienne Connecté à un Bus HVDC

Soutenue le 07/07/2021, devant le jury composé de :

Mhamed HELAIMI	MCA	Université de Chlef	Président
Abdallah ZEGAOU	MCA	Université de Chlef	Directeur de thèse
Michel AILLERIE	Professeur	Université de Lorraine	Co-Directeur de thèse
Tayeb ALLAOU	Professeur	Université de Tiaret	Examineur
Rachid TALEB	Professeur	Université de Chlef	Invité
Zhixue ZHENG	Maitre de conférences	Université de Lorraine	Examinatrice
Elhadj BOUNADJA	MCA	Université de Chlef	Examineur

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté : Technologie

Département : Electrotechnique



LMOPS



CentraleSupélec

THÈSE EN CODIRECTION

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electrique et Haute tension

Par

FATIMA ZOHRA NAAMA

Thème :

**Modélisation et Amélioration du Rendement Energétique
d'un Système de Conversion d'Energie Eolienne
Connecté à un Bus HVDC**

Soutenue le 07/07/2021, devant le jury composé de :

Mhamed HELAIMI	MCA	Université de Chlef	Président
Abdallah ZEGAOU	MCA	Université de Chlef	Directeur de thèse
Michel AILLERIE	Professeur	Université de Lorraine	Co-Directeur de thèse
Tayeb ALLAOU	Professeur	Université de Tiaret	Examinateur
Rachid TALEB	Professeur	Université de Chlef	Invité
Zhixue ZHENG	Maitre de conférences	Université de Lorraine	Examinatrice
Elhadj BOUNADJA	MCA	Université de Chlef	Examinateur

Ce travail est dédié à :

Mes chers parents

Mes chers frères : Amine, Fayçal, Ramzi

Ma sœur Rayhene

Mon mari Nadir

« Seul, celui qui en fait par lui-même l'expérience, sait ce que sont les années de recherche, dans les ténèbres, pour une vérité que l'on sent, sans pouvoir l'exprimer, l'intense désir et les alternatives de confiance et de doute, jusqu'à ce que l'on atteigne la clarté et la connaissance »

Albert EINSTEIN

Remerciements

Ce manuscrit de thèse est le résultat de quatre années de travaux de recherche, fruit de la collaboration entre le laboratoire LGEER de l'université de Chlef, Algérie, et le laboratoire LMOPS de l'université de Lorraine et CentraleSupélec, Metz, France. Pour ces quatre années passionnantes, j'aimerais tout d'abord exprimer mes sincères remerciements à mes directeurs de thèse, Docteur Abdallah ZGAOUI pour avoir proposé et dirigé ce sujet de thèse, et de m'avoir orientée, pour finaliser ma thèse au laboratoire LMOPS, un grand Merci pour votre disponibilité, votre soutien, et votre compétence, ainsi que votre confiance en moi.

Mes remerciements intenses vont également à mon co-directeur de thèse Professeur Michel AILLERIE qui m'a permis de couronner mes travaux de thèse en m'accordant sa confiance, Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa parfaite compétence, de son dynamisme, et de son efficacité, et pour tout l'encouragement qu'il m'a apporté alors que je n'en voyais plus la fin.

Je remercie vivement Docteur Zhixue ZHENG, Maitre de Conférences à l'université de Lorraine, pour sa disponibilité et ses conseils. Merci aussi pour les discussions fructueuses et l'attention qu'elle a accordé à mon travail, cette thèse ne serait pas ce qu'elle est sans les nombreux échanges et interactions que nous avons eus.

Je remercie également Professeur Abdelkader DJAHBAR, pour sa participation dans l'encadrement de cette thèse et pour les échanges scientifiques pour réussir la partie de modélisation de mon travail.

Un grand Merci aussi au Docteur Ahmed DERROUZIN pour ses conseils, sa présence et son amitié.

Je suis également reconnaissante à Madame Saliha Kheris pour ses encouragements, ses conseils pour réussir mon doctorat, ainsi que son amitié.

Je tiens à remercier Professeur Nicolas FRESSENGEAS le directeur du Laboratoire LMOPS de m'accueillir au sein de son Laboratoire pour finaliser mes travaux de thèse, ainsi que tous les collègues et personnel du Laboratoire LMOPS sans exception, qui m'ont offert des conditions favorables de travail.

J'exprime vivement mes remerciements aux membres de jury qui ont bien voulu présider et examiner ma thèse. Je cite respectivement Monsieur **Mhamed HELAIMI** d'avoir accepté d'être président de mon jury de thèse, Monsieur **Rachid TALEB** et Monsieur **Elhadj BOUNADJA** de l'université de Chlef, Monsieur **Tayeb ALLAoui** de l'université de Tiaret, Madame **Zhixue Zheng** de l'université de Lorraine.

Mes vifs remerciements s'adressent à mes chers parents pour leur soutien et leur patience, ainsi que leur amour, à mes frères Amine, Fayçal, Ramzi. Si j'ai réussi à réaliser mon

rêve de doctorat c'est grâce à la présence, la disponibilité et le soutien de mon grand frère Amine « un grand merci Frérot », à ma chère sœur Rayhene ; je lui souhaite que de la réussite avec Ramzi et Fayçal dans les années à venir.

Mes sincères remerciements à mon mari Nadir, pour sa patience, sa disponibilité, son soutien, et ses encouragements pour réussir et finaliser ma thèse.

Je voudrais également témoigner mon amitié et ma parfaite reconnaissance à tous mes amis les thésards du LMOPS ; Rim, Sarah, Christelle, Rabeb, Nawel, Sadaqat, Mehamed, pour les bons moments de joie, d'amitié, de motivation, et d'encouragements.

Et comme disait Marcel proust : « Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes fleurissent », je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de cette thèse.

RÉSUMÉ

Le travail effectué dans le cadre d'une thèse de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef en Algérie a été réalisé en étroite collaboration avec l'Université de Lorraine et l'école CentraleSupélec en France où j'ai effectué des séjours longs au cours de ces années de doctorat. Cette thèse est intitulée : « **Modélisation et amélioration du rendement énergétique d'un système de conversion d'énergie éolienne connectée à un bus HVDC** » et elle a été encadrée par Professeur Abdallah Zegaoui du laboratoire LGEER de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef en Algérie et par Professeur Michel Aillerie, co-directeur et par Docteure Zhixue Zheng, co-encadrante, tous deux du laboratoire LMOPS de l'Université de Lorraine et l'école CentraleSupélec en France.

Cette thèse avait pour objectifs originaux, objectifs qui ont été atteints pendant ce travail et comme son titre l'indique, la modélisation et l'amélioration du rendement d'un générateur d'énergie électrique d'origine renouvelable et principalement d'origine éolien. L'étude a donc porté sur principalement de la modélisation et l'optimisation des différentes parties de la chaîne de production constituée par une turbine éolienne, un générateur électrique et un système de conversion électrique de puissance, lorsque la ressource énergétique éolienne permet, via le système que nous avons développé d'alimenter une charge ou un bus à courant continu.

MOTS CLES

Energie Renouvelable, Développement Durable, Eolienne, génératrice synchrone à aimant permanent, Convertisseur Boost, Super-condensateur, Batterie, Bus à courant continu, Modélisation, Optimisation énergétique, Matlab/Simulink.

ABSTRACT

The work carried out as part of a thesis at the University Hassiba Ben Bouali de Chlef in Algeria was carried out in close collaboration with the University of Lorraine and the CentraleSupélec school in France. This thesis is entitled: "Modeling and improvement of the energy efficiency of a wind energy conversion system connected to an HVDC bus" and it was supervised by Professor Abdallah Zegaoui from the LGEER laboratory of the Hassiba Ben Bouali University of Chlef in Algeria and by Professor Michel Aillerie, co-director and by Doctor Zhixue Zheng, co-supervisor, both from the LMOPS laboratory of the University of Lorraine and the CentraleSupélec school in France.

This thesis had for original objectives the modeling and the improvement of the efficiency of an electric energy generator of renewable origin and mainly of wind origin. The study therefore focused mainly on the modeling and optimization of the different parts of the production chain consisting of a wind turbine, an electric generator and an electrical power conversion system, when the wind energy resource allows, via the system that we have developed to supply a load or a direct current bus

Keywords

Renewable Energy, Sustainable Development, Wind turbine, Permanent magnet synchronous generator, Boost converter, Super-capacitor, Battery, DC bus, Modeling, Energy optimization, Matlab / Simulink..

ملخص:

تم تنفيذ العمل في إطار انجاز أطروحة الدكتوراه في جامعة حسيبة بن بوعلي الشلف بالجزائر بالتعاون الوثيق مع جامعة لورين في فرنسا .

هذه الرسالة بعنوان : نمذجة و تحسين الطاقة لنظام تحويل طاقة الرياح المتصل بشبكة تيار مباشر عالي الضغط . اشرف عليها الدكتور عبد الله زقاوي من مختبر الهندسة الكهربائية و الطاقات المتجددة من جامعة حسيبة بن بوعلي شلف . و البروفيسور ميشال ايري المشرف المشترك و الدكتورة زيكسو زانق مشرفة مشاركة من مختبر الضوئيات و أنظمة المواد البصرية المخبرية .

أساس هذه الأطروحة هو تحقيق أهداف أصلية التي تحققت بالتعاون مع جامعة لورين خلال العمل المشترك و الهدف الرئيسي هو تحسين نمذجة و كفاءة مولد الطاقة الكهربائية من أصل متجدد و خاصة مصدر الرياح .

ركزت الدراسة بشكل أساسي على نمذجة و تحسين الأجزاء المختلفة من سلسلة الإنتاج التي تتكون من توربينات الرياح , و مولد كهربائي و نظام تحويل الطاقة الكهربائية عندما يسمح مصدر طاقة الرياح عبر النظام الذي قمنا بتطويره لتزويد حمولة أو ناقل تيار الشبكة المباشر .

الكلمات الرئيسية :

-الطاقات المتجددة - توربينات الرياح - مولد مترامن- مغناطيسي دائم -محول دفعة -مكثف فائق - بطارية- ناقل تيار مستمر -النمذجة - تحسين الطاقة - ماطلب سميلينك .

SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	III
<i>Résumé français</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
<i>Résumé arabe</i>	IX
Sommaire	XI
Introduction Générale	1
Chapitre 1. Les énergies renouvelables	11
Chapitre 2. L'énergie éolienne	57
Chapitre 3. Etude et modélisation d'une éolienne en fonctionnement autonome	95
Chapitre 4. Etude et modélisation d'une source éolienne avec stockage couplée à un bus HVDC	135
Conclusion générale et Perspectives	191
Table générale des Figures	199
Table des Matières	203
Liste des publications	207
Annexe	211

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

SOMMAIRE DE L'INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. INTRODUCTION-RESUME COURT	5
2. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL	5
3. OUTILS EXPERIMENTAUX ET D'ANALYSE, METHODOLOGIE SUIVIE	6
4. RETOMBEES SCIENTIFIQUES ET TRAVAUX ASSOCIES A MON TRAVAIL DE THESE.....	8
4.1. Travaux de publications et communications	9
4.2. Membre d'un projet ANR.....	9
5. MOTS CLES	9

1. INTRODUCTION-RESUME COURT

Le travail effectué dans le cadre d'une thèse de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef en Algérie a été réalisé en étroite collaboration avec l'Université de Lorraine et l'école CentraleSupélec en France où j'ai effectué des séjours longs au cours de ces années de doctorat. Cette thèse est intitulée : « **Modélisation et amélioration du rendement énergétique d'un système de conversion d'énergie éolienne connectée à un bus HVDC** » et elle a été encadrée par Professeur Abdallah Zegaoui du laboratoire LGEER de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef en Algérie et par Professeur Michel Aillerie du laboratoire LMOPS de l'Université de Lorraine et l'école CentraleSupélec en France.

Cette thèse avait pour objectifs originaux, objectifs qui ont été atteints pendant ce travail et comme son titre l'indique, la modélisation et l'amélioration du rendement d'un générateur d'énergie électrique d'origine renouvelable et principalement d'origine éolien. L'étude a donc porté principalement sur la modélisation et l'optimisation des différentes parties de la chaîne de production constituée par une turbine éolienne, un générateur électrique et un système de conversion électrique de puissance, lorsque la ressource énergétique éolienne permet, via le système que nous avons développé d'alimenter une charge ou un bus à courant continu.

2. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

De nos jours la part des énergies renouvelables telles que les centrales éoliennes ou photovoltaïques ne cessent de contribuer positivement et d'une façon croissante dans le mix énergétique mondial. La part de la production des centrales éoliennes dans le marché d'énergie électrique reste bien avancée et toujours en progression constante par rapport à l'apport des autres filières dans les énergies renouvelables.

Actuellement, de nombreuses recherches sont menées afin d'augmenter la production éolienne et son rendement que ce soit pour un usage dans des sites isolés, en micro-réseau

ou connecté aux réseaux de distribution nationaux. Ces travaux portent sur la turbine elle-même, sur le convertisseur et le couplage à divers types de réseaux, DC ou AC.

Récemment, la distribution électrique sur bus à courant continu a montré un grand intérêt, particulièrement comme solution de distribution intermédiaire avant la conversion DC-AC ou comme réseau de distribution additionnel pour l'appareillage électronique. Dans ce contexte, le présent sujet de thèse considère de façon originale la chaîne de production d'énergie éolienne complète de moyenne puissance constituée par une turbine, les convertisseurs d'énergie et la connexion à un bus haute tension courant continu (HVDC) de 500 à 1000 volts. Cette nouvelle approche peut-être assimilée à un concept de type Lego avec des briques élémentaires pouvant être associées pour former une structure complexe et performante. Dans notre approche, les briques élémentaires sont constituées de sources d'énergie renouvelable associées en parallèle sur un bus à courant continu, architecture distribuée, pour former une centrale individuelle, connectée ou non au réseau via un onduleur.

Les briques éoliennes élémentaires que nous considérons dans ce travail de thèse sont toutes deux composées d'une turbine éolienne individuelle avec une intégration d'un système de stockage. Elles seront connectées à des briques de stockage, comme les supercondensateurs et batteries sur le bus de sortie DC lui permettant de délivrer le maximum de puissance sous une tension constante.

3. OUTILS EXPERIMENTAUX ET D'ANALYSE, METHODOLOGIE SUIVIE

Sur la base d'une recherche bibliographique conséquente et d'expérimentations sur le banc éolien du laboratoire LMOPS, la modélisation des différentes parties de la chaîne sera effectuée.

Après un travail bibliographique conséquent et à l'issue de ce premier travail ayant permis d'approfondir les connaissances et de se familiariser avec l'équipement, le travail a consisté à l'optimisation du fonctionnement de la brique éolienne de base sans considération dans un premier temps de la mise en parallèle de plusieurs briques, c'est à

dire sans tenir compte de l'influence des variations de la charge, mais uniquement des variations de la source.

Pour cela, nous avons étudié plus spécifiquement le fonctionnement et l'optimisation de la turbine éolienne et de sa génératrice associée, une génératrice synchrone à aimant permanent, GSAP, appelée Permanent magnetic synchrone generator en anglais, PMSG dans les publications internationales. Ceci a été réalisé pour faire ressortir de façon plus générales les paramètres importants, influençant les conditions de fonctionnement des turbines éoliennes. C'est pour cela que dans le but d'améliorer le rendement global de la chaîne de production, des modélisations de l'ensemble « turbine-GSAP » ont été développées dans l'environnement Matlab/Simulink à partir d'algorithmes originaux. Nos résultats ont ensuite été comparés aux résultats obtenus plus classiquement avec les fonctions intégrées de Matlab/Simulink. Dans cette phase de simulation, nous avons utilisé les données constructeurs d'une éolienne ANELION SW 3.5-GT avec des vitesses de vent couvrant la plage de fonctionnement de cette turbine.

Suite à cette caractérisation, principalement considérant le critère du rendement des turbines en utilisation standard, une solution opérationnelle unique sera retenue comme support expérimental pour la suite de l'étude. Cette solution retenue retiendra les convertisseurs boost à haut facteur de conversion et à haut rendement développés par l'équipe de recherche. Ces convertisseurs initialement développés pour le photovoltaïque ont été, dans cette étude, adaptés à l'éolien en particulier suite leurs niveaux de tension et puissance mise en jeu. Ces nouveaux développements ont été également réalisés dans l'environnement Matlab/Simulink.

Dans la suite de ce travail, l'optimisation individuelle des différents paramètres de la puissance issue de la turbine a été développée en considérant l'énergie éolienne disponible et ses variations et en tenant compte de l'adaptation entre la turbine et le convertisseur. Ce programme constitue une première boucle de régulation interne. Dans cette nouvelle approche, nous avons analysé dans un premier temps le fonctionnement sans considération d'un système de stockage ni un bus HVDC mais uniquement à la fourniture de puissance énergétique à une charge isolée. Dans un deuxième temps et après avoir étudié et modélisé

le stockage de l'énergie électrique dans des super-condensateurs et batteries, nous avons procédé à la connexion sur un bus à courant continu de l'ensemble constitué de la chaîne de production éolienne et celle du stockage. Tout ce travail a été fait également dans l'environnement Matlab/Simulink avec des programmes originaux développés au cours de mes travaux.

Il est à noter qu'une attention particulière a été portée également à l'optimisation du couplage avec le système de stockage. En effet, nous avons tenu compte des précédents travaux de modélisation dans la littérature et ceux fait en début de thèse, la gestion de l'énergie produite entre le stockage et le bus DC. Nous avons alors étudié ce couplage pour un fonctionnement de l'éolienne à son point de fonctionnement nominal, pour des vitesses de vents changeantes de façon discrète, monotone et non monotone et dans le cas général de variations continues.

Cette dernière étape, conclusive de mon travail, permet d'atteindre les objectifs initiaux fixés en début de thèse par le développement d'un nouveau modèle prenant en compte l'aspect efficacité énergétique de la chaîne éolienne associée à un stockage délivrant une puissance optimisée sur un bus à courant continu avec un niveau constant de la tension.

Il est à noter que cette recherche est basée sur la mise en œuvre d'une éolienne commerciale qui a été utilisée comme référence tout au long de ce travail de thèse. Il s'agit de l'éolienne ANELION SW 3.5-GT. Cette éolienne a été choisie car elle est installée et en fonctionnement réel au laboratoire LMOPS de l'Université de Lorraine. Pendant ce travail de thèse, j'ai participé à la conception de ce banc, sachant que la réalisation dépendait du laboratoire LMOPS mais également de l'Institut Universitaire de Thionville-Yutz dans lequel il est installé. Même si nos résultats ont pu être validés par comparaison avec la notice technique de l'éolienne, il sera intéressant de comparer nos résultats de modélisation avec ceux obtenus avec le nouveau banc d'essai expérimental.

4. RETOMBÉES SCIENTIFIQUES ET TRAVAUX ASSOCIÉS À MON TRAVAIL DE THÈSE

Il est important de signaler ici deux points importants relatifs à mon travail de thèse.

4.1. TRAVAUX DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Le premier concerne le fait que ce travail a donné lieu à une publication internationale de rang A, plusieurs actes de conférences publiés et à plusieurs communications lors de conférences internationales, dont une conférence invitée. La liste est fournie en fin de ce document.

4.2. MEMBRE D'UN PROJET ANR

Le deuxième point est que j'ai été intégrée dans un projet de l'Agence National de la Recherche Française obtenu par notre équipe MCS_PV du LMOPS pour mes travaux de doctorat. Ce projet **ANR JCJC Eremite** pour « Efficiency and Reliability Enhancement of a Multi-Source DC Microgrid Dedicated to Residential Applications by Integrating Bi-Level Managements », dont la responsable est Dr Zhixue Zheng a été obtenu en 2019. J'interviens dans ce projet dans lots de travaux (work-packages : WP) suivants :

- WP1 : « Modélisation et caractérisation des éléments d'un micro-réseau ». J'interviens plus spécifiquement dans la tâche : « Architecture du système, dimensionnement, modélisation et caractérisation » et dans la tache « Conception et réalisation de convertisseurs AC / DC dédiés à la production éolienne ».
- WP2 : « Conception et réalisation de la stratégie de gestion de l'énergie (Energy Management Strategy), EMS ». J'interviens dans la tâche « Prise de décision EMS basée sur un contrôleur flou amélioré ». Ces derniers travaux seront plus spécifiquement abordés en travaux post doctoraux.

5. MOTS CLES

Energie Renouvelable, Développement Durable, Eolienne, génératrice synchrone à aimant permanent, Convertisseur Boost, Super-condensateur, Batterie, Bus à courant continu, Modélisation, Optimisation énergétique, Matlab/Simulink.

CHAPITRE I

Les énergies renouvelables

Chapitre I

Les énergies renouvelables

SOMMAIRE DU CHAPITRE I

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE I	15
1. INTRODUCTION.....	17
2. LA BIOMASSE	18
3. LA GEOTHERMIE	22
4. L'ENERGIE HYDRAULIQUE-HYDROELECTRIQUE.....	26
5. L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE.....	29
6. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	33
7. L'ENERGIE SOLAIRE. POTENTIEL ALGERIEN ET BILAN.....	36
8. L'ENERGIE EOLIENNE	39
9. L'ENERGIE EOLIENNE. POTENTIEL ALGERIEN ET BILAN.....	51
10. CONCLUSION	53
11. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE I	54

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE I

Figure 1.1 : Production des énergies renouvelables dans le monde	17
Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale biomasse.....	19
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique	23
Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	26
Figure 1.5 : Exemple de la solaire thermique haute température.....	30
Figure 1.6 : Exemple Les installations sur site isolé	34
Figure 1.7 : Exemple d'une installations raccordées au réseau injection totale	35
Figure 1.8 : Exemple d'une installations raccordées au réseau injection surplus	36
Figure 1.9 : Mini-centrale solaire à Ghardaïa.....	37
Figure 1.10 : Rotor de Savonius.....	42
Figure 1.11 : Rotor Darrieus	43
Figure 1.12 : Eolienne à axe horizontal	44
Figure 1.13 : Moulin à toit tournant.....	45
Figure 1.14 : Moulin à cage tournante	46
Figure 1.15 : Eolienne onshore.....	49
Figure 1.16 : Eolienne offshore	50
Figure 1.17 : Ferme éolienne verticales d'Adrar 10 (MW).....	52

1. INTRODUCTION

Dans tous les pays du monde la part de l'électricité joue un rôle très important au développement économique, son accroissement est assuré avec les progrès techniques et le développement des différentes énergies (renouvelables et non renouvelables) Face au nucléaire, au pétrole, au gaz et au charbon, Les énergies renouvelables apportent des réponses durables quant aux préoccupations relatives à la sécurité, la santé, l'environnement et l'économie. [1]

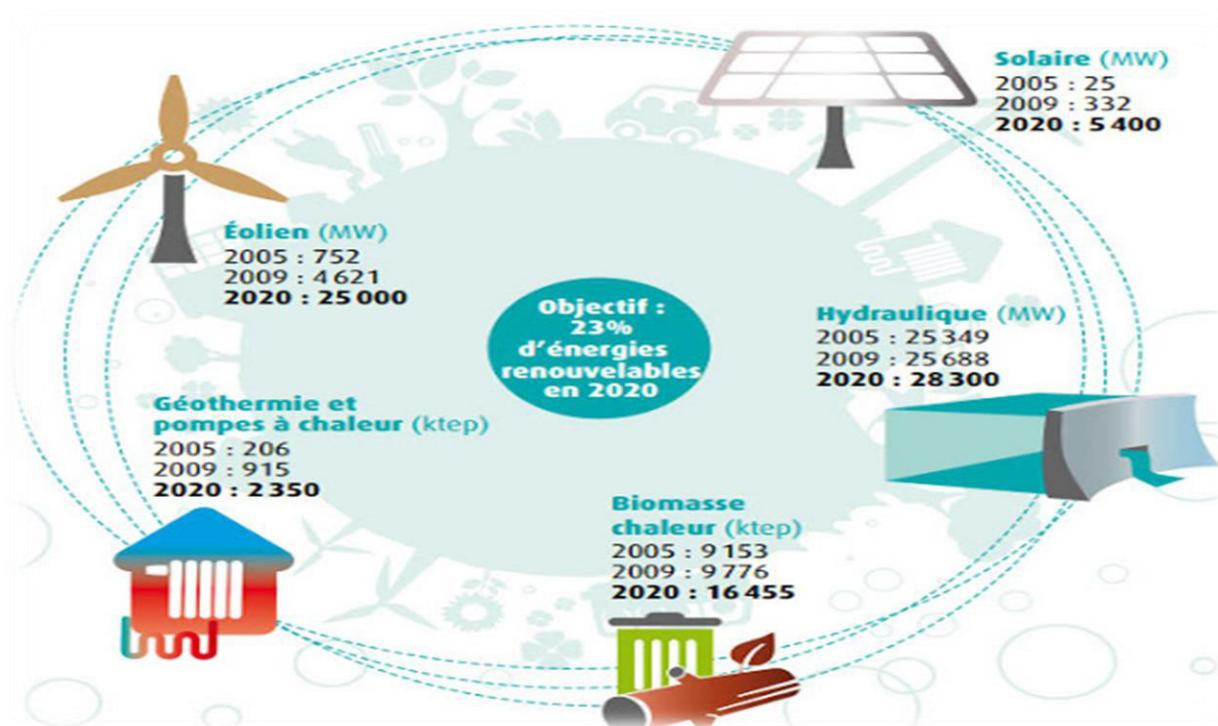


Figure 1.1 : Production des énergies renouvelables dans le monde

Les ENR servent à répondre aux mêmes besoins que les autres formes d'énergie. En effet, elles peuvent être utilisées pour générer de l'électricité, dans ce cas elles peuvent alimenter des exploitations agricoles, des habitations et des immeubles. On les utilise aussi pour le chauffage, l'électricité, le transport et l'éclairage. Les ENR offrent aussi aux territoires ruraux l'opportunité d'accès à une source d'énergie qui est propre et décentralisée.[2]

Les principales énergies renouvelables proviennent du vent (éolienne), du soleil (thermique, photovoltaïque, thermodynamique), de la chaleur terrestre (géothermie), de l'eau (hydroélectricité, marémotrice), de la biodégradation (biomasse) ou de biocarburant.

La biomasse et le PV solaire, fournissent de l'énergie électrique, de la chaleur, de la force motrice et un approvisionnement en eau à des dizaines de millions de personnes dans les zones rurales de pays en développement. Elles desservent ainsi l'agriculture, des petites industries, des foyers, des écoles et comblent d'autres besoins communautaires.

L'utilisation de ces énergies n'est pas récente (moulins, feu de bois, thermes...), C'est seulement au moyen Age, que les moulins à vent font leur apparition en Italie, en France puis en Espagne et au Portugal. On les rencontre, un peu plus tard, en Grande-Bretagne, en Hollande et en Allemagne. [3]

Dans la suite de ce chapitre, je présente les différentes possibilités d'énergie renouvelable disponible sur la planète en les définissant, rappelant leurs propriétés, le principe de production d'énergie associé et leur utilisation. Je finirai chaque partie en résumant leurs avantages et inconvénients.

2. LA BIOMASSE

L'énergie biomasse, ou bioénergie, est considérée comme la quatrième source d'énergie (derrière le pétrole, le charbon et le gaz naturel), en participant à environ 14% de la production mondiale d'énergie primaire. [4]

D'un point de vue chimique, la biomasse peut être définie comme un hydrocarbure constitué principalement de C, H, O et de N, [5], Elle contient également des éléments inorganiques tels que : Ca, Mg, K et Si. Les proportions de ces derniers varient en fonction de la nature, de l'origine, de l'âge et des conditions de croissance de la biomasse considérée (type et humidité du sol, ensoleillement), [6], La biomasse désigne aussi l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol). Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation, La biomasse n'est considérée comme une source

d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres. [7]

Jusqu'au 18^e siècle, la biomasse était la principale ressource énergétique utilisée par l'homme, en particulier sous forme de bois ; même aujourd'hui, selon l'Agence internationale de l'énergie, la biomasse et les déchets fournissent 10 % de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3 % d'énergies renouvelables [8] [9]. Mais cette ressource produit de nombreux polluants et a l'inconvénient majeur d'exiger des surfaces considérables pour sa production.

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- De la chaleur ;
- De l'électricité ;
- Une force motrice de déplacement.

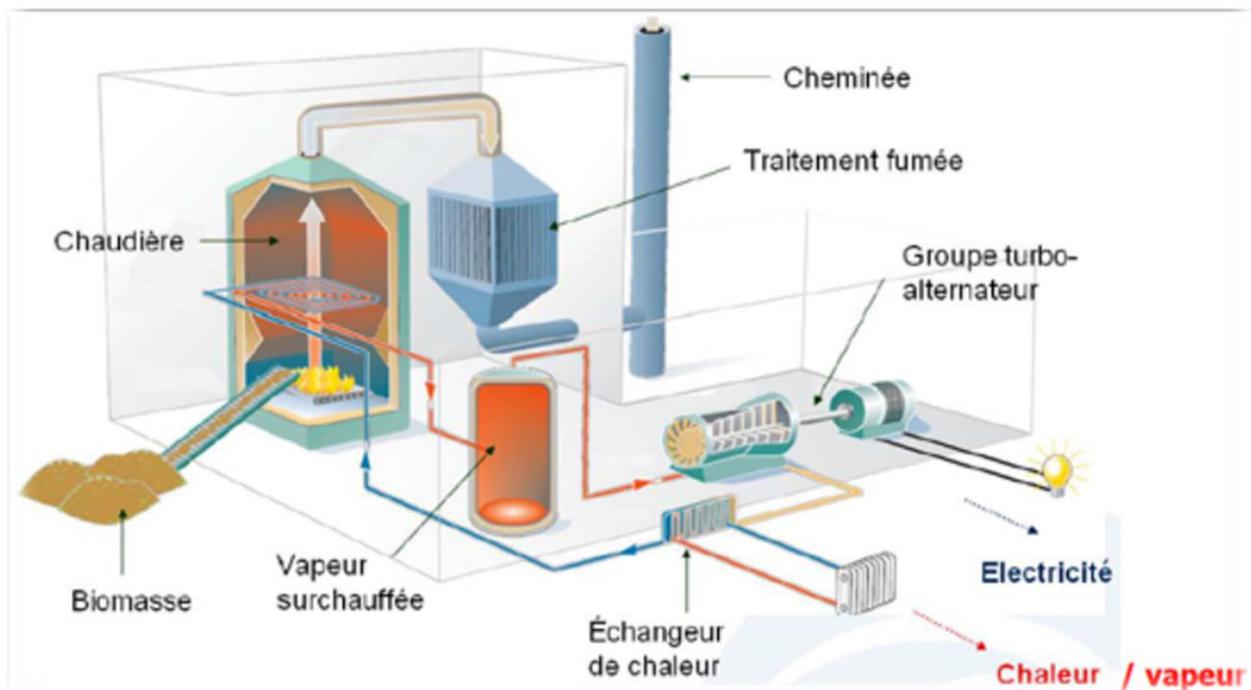


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale biomasse

On distingue trois procédés de valorisation de la biomasse : la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants.

2.1. LA VOIE SECHE

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermo-chimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse :

- **La combustion** produit de la chaleur par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est appelée cogénération ;
- **La gazéification** de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste en une réaction entre le carbone issu de la biomasse et des gaz réactants (la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible composé d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Ce gaz, après épuration et filtration, est brûlé dans un moteur à combustion pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité. La cogénération est également possible avec la technique de gazéification ;
- **La pyrolyse** est la décomposition de la matière carbonée sous l'action de la chaleur. Elle conduit à la production d'un solide, le charbon de bois ou le charbon végétal, d'un liquide, l'huile pyrolytique, et d'un gaz combustible. Une variante de la pyrolyse, la thermolyse, est développée actuellement pour le traitement des déchets organiques ménagers ou des biomasses contaminées.

2.2. LA VOIE HUMIDE

La principale filière de cette voie est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- **Le biogaz** qui est le produit de la digestion anaérobie des matériaux organiques ;

- **Le digestat** qui est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable.

2.3. LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux créés à partir d'une réaction :

- Entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool dans le cas du biodiesel ;
- À partir d'un mélange de sucre fermenté et d'essence dans le cas du bioéthanol .

Il existe 3 générations de biocarburants :

- **1^{ère} génération** : biocarburants créés à partir des graines ;
- **2^e génération** : biocarburants créés à partir des résidus non alimentaires des cultures (paille, tiges, bois) ;
- **3^e génération** : biocarburants créés à partir d'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir d'huile produite par des microalgues.

Les biocarburants de 2^e et 3^e génération ont entre autres pour vertu de ne pas « occuper » un territoire agricole en compétition avec la production d'aliments pour l'homme. Leur maturité industrielle, tout particulièrement pour la 3^e génération, reste à établir.

Ces biocarburants peuvent prendre différentes formes :

- Des esters d'huiles végétales produits, par exemple, à partir du colza (biodiesel) ;

De l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl ether). Cet ETBE favorise l'incorporation d'éthanol dans les essences (jusqu'à 15% du volume dans le SP95 et le SP98, jusqu'à 22% dans le cas du SP95-E10). [10]

2.4. LES AVANTAGES DE LA BIOMASSE

- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- Biodégradable rapidement.
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxique.
- Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse).
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables.
- La biomasse est disponible partout.
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

2.5. LES INCONVENIENTS DE LA BIOMASSE

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Dégage du CO₂.
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.
- Provoque la pollution des eaux et des sols.

3. LA GEOTHERMIE

La géothermie, du grec Géo (la terre) et Thermos (la chaleur) désigne à la fois la chaleur terrestre et son exploitation par l'homme, L'énergie géothermique est la chaleur qui se trouve sous la surface de la Terre. L'origine de cette chaleur est double : dans une petite mesure, elle vient du Soleil qui réchauffe la surface de la Terre. Toutefois, c'est principalement le magma, qui se situe au cœur de la planète, qui chauffe la croûte terrestre [11]. Le terme "géothermie" Il désigne le processus qui permet de capter en profondeur la chaleur terrestre pour la transformer en source d'électricité ou de chauffage.

L'exploitation de la chaleur souterraine se fait via un système de canalisations dans lesquelles circule un échange de courants chauds et froids. La géothermie est une source d'énergie renouvelable, car la chaleur qui provient du centre de la terre est illimitée.[12]

Dans les paragraphes suivants, je présente les différents types de géothermie généralement classifiées par les experts.

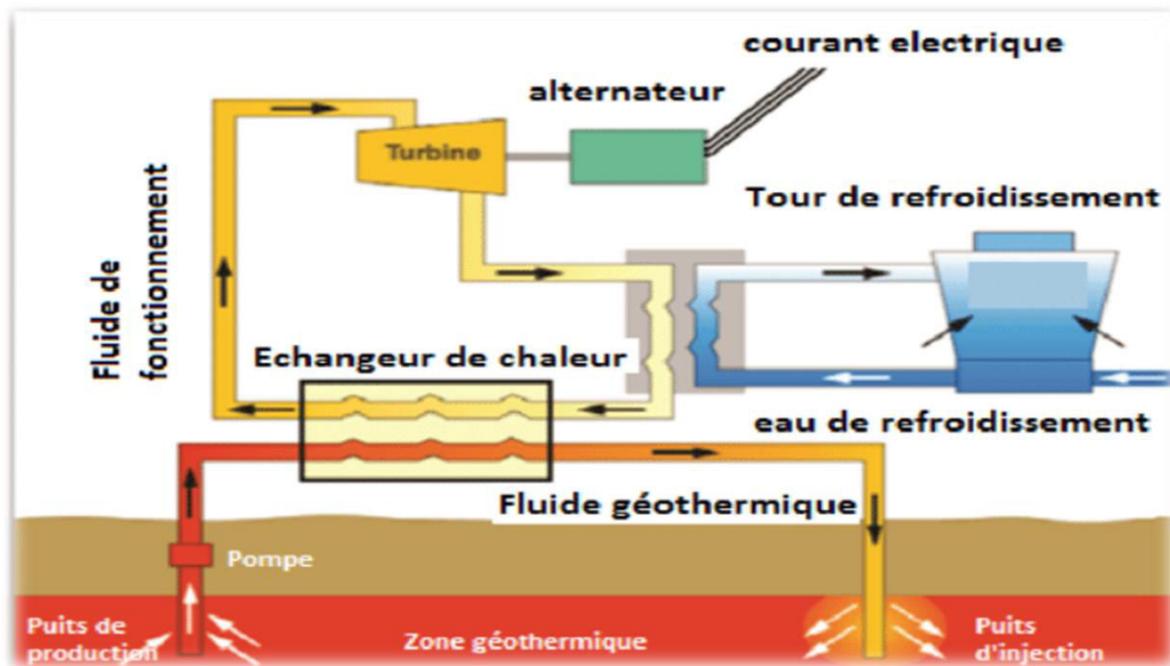


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique

3.1. CLASSIFICATION DE LA GEOTHERMIE

3.1.1. LA GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE

S'applique aux nappes d'une profondeur inférieure à 100 m et à faible niveau de température (moins de 30°C). La chaleur extraite est utilisée généralement pour assurer le chauffage et le rafraîchissement des locaux après élévation de la température au moyen d'une pompe à chaleur.

3.1.2. LA GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

Appelée aussi basse température ou basse enthalpie, explore des aquifères situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. La température atteint entre 30°C et 90°C : trop

faible pour produire de l'électricité mais idéal pour produire de la chaleur. Les applications vont du chauffage urbain au thermalisme, en passant par le chauffage des serres et le séchage des produits agricoles.

3.1.3. LA GÉOTHERMIE MOYENNE ÉNERGIE

Aussi appelée moyenne enthalpie, explore le plus souvent des gisements d'eau chaude ou de vapeur humide compris entre 90 et 150°C. Dans les bassins sédimentaires, il faut atteindre des profondeurs de 2000 à 4 000 mètres pour obtenir ces températures. Dans des zones plus propices, la géothermie moyenne énergie pourra être exploitée à moins de 1000 mètres. Cette voie est utilisée pour produire de la chaleur, valorisée notamment dans des processus industriels, et éventuellement de l'électricité.

3.1.4. LA GÉOTHERMIE HAUTE TEMPÉRATURE

Ou haute enthalpie, exploite des fluides atteignant des températures supérieures à 150°C, pour produire de l'électricité. Les réservoirs sont localisés entre 1500 à 3000 mètres de profondeur, généralement dans les zones de volcanisme ou de tectonique active.

3.1.5. LA GÉOTHERMIE PROFONDE ASSISTÉE

Est une voie de recherche qui consiste à extraire la chaleur des roches chaudes fissurées situées entre 3 et 5 kilomètres de profondeur. Contrairement à la géothermie haute température classique qui exploite des réservoirs capables de fournir des débits de fluides élevés, la géothermie profonde assistée nécessite de stimuler les roches peu perméables en injectant de l'eau sous forte pression dans le sol.

3.1.6. LA GEOTHERMIE POUR PRODUIRE DE LA CHALEUR

La géothermie très basse et basse énergie utilise l'énergie du sous-sol pour produire de la chaleur, soit de façon indirecte grâce à des pompes à chaleur pour élever le niveau de température (géothermie très basse énergie), soit de façon directe (géothermie à basse énergie).

3.1.7. LA GÉOTHERMIE POUR LA CLIMATISATION

Si une pompe à chaleur est un réfrigérateur à l'envers, une pompe à chaleur à l'envers est...un réfrigérateur ! La géothermie peut donc assurer non seulement la production de chaleur en hiver, mais aussi la production de froid en été. On parle alors de pompe à chaleur réversible : elle est équipée d'un dispositif permettant d'inverser le cycle du fluide frigorigène. Le condenseur devient l'évaporateur, l'évaporateur devient condenseur et la pompe à chaleur puise alors des calories dans le bâtiment pour les rejeter dans le sol. [13]

3.2. LES AVANTAGES DE LA GEOTHERMIE

- Cette source d'énergie reste très discrète contrairement aux éoliennes ou aux panneaux solaires qui sont bien plus voyants sur votre habitation.
- Il faut savoir que la géothermie ne dépend pas des conditions climatiques contrairement aux panneaux solaires qui ont besoin de soleil ou aux éoliennes qui ont besoin de vent. C'est notamment pour cette raison que les États-Unis sont les plus grands producteurs de géothermie.
- Contrairement à d'autres sources d'énergie, la géothermie utilise uniquement des éléments naturels qui sont notamment la chaleur de la Terre et l'eau. Ainsi, aucune réaction chimique ou physique n'est nécessaire
- La géothermie à basse énergie peut être utilisée pour le chauffage de nos habitations.

3.3. LES INCONVENIENTS DE LA GEOTHERMIE

- L'installation géothermique peut être faite partout, sur tous les terrains certes, mais cette énergie est tout de même optimisée sur certains terrains bien spécifiques.
- La rentabilité de l'installation géothermique n'est pas immédiate. En effet, investir dans la géothermie engendre un budget conséquent compris entre 20 000 € et 40 000 €, ce qui n'est pas à la portée de tous. La rentabilisation de votre investissement se fait uniquement après 5 ans d'utilisation environ.
- Il est également nécessaire d'intervenir régulièrement pour que l'eau utilisée pour produire cette énergie dans le sol soit réintroduite à une distance bien précise. En effet,

cela ne fonctionne pas n'importe comment, et une petite aide extérieure est parfois nécessaire.

4. L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE-HYDROELECTRIQUE

L'hydraulique est une des premières énergies domestiquée par l'homme (moulins au fil de l'eau, bateaux à aubes,...). L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIXe siècle. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très importants, [14] L'hydroélectricité prend sa place dans un mix de production diversifié combinant toutes les énergies : nucléaire, thermique à flamme (charbon, fioul, gaz naturel) et énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, biomasse). Sa souplesse de fonctionnement et sa rapidité d'utilisation lui confèrent une place privilégiée dans les parcs de production, comme base de la production d'électricité ou comme moyen d'ajustement lors des pics de consommation en électricité. Avec des coûts de production très bas.[15]

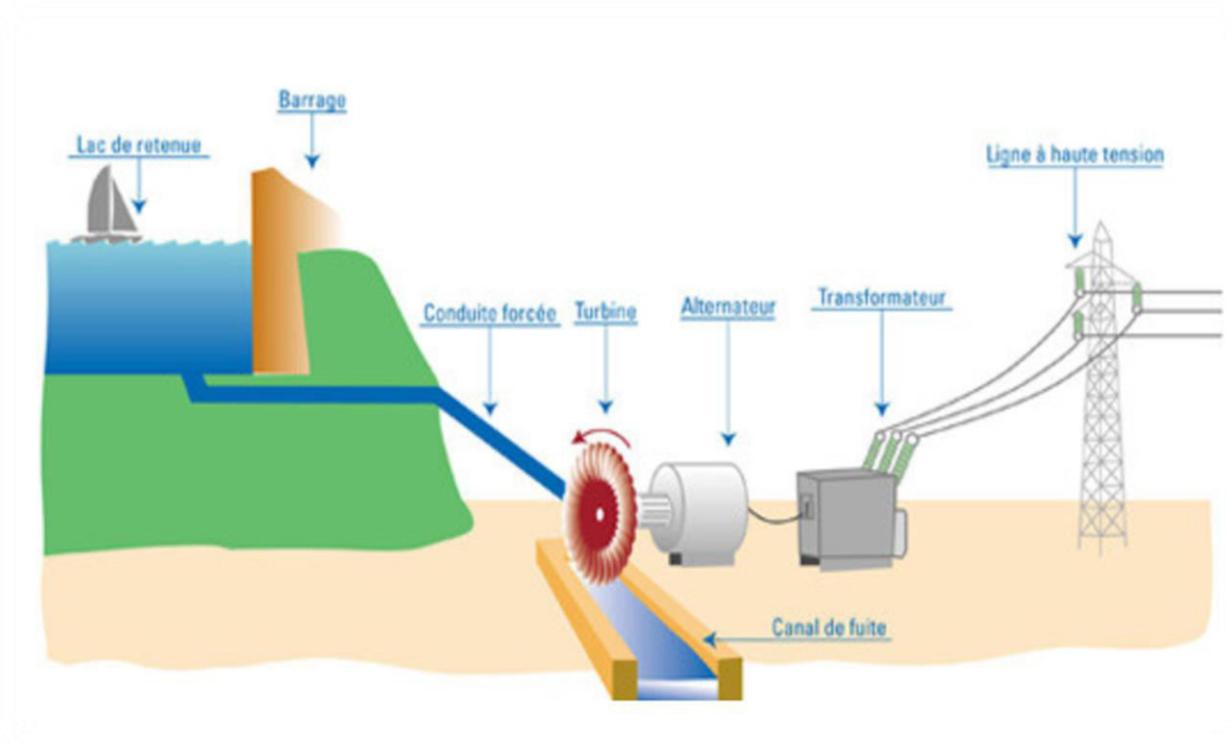


Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

4.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE HYDROELECTRIQUE:

1- La retenue de l'eau

Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.

2- La conduite forcée de l'eau

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas.

3- La production d'électricité

À la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif, La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute et du débit de l'eau. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

4- L'adaptation de la tension

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension.

L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite.

4.2. LES AVANTAGES DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE

- L'énergie hydraulique permet de réguler les pics de consommation d'électricité survenant en hiver par exemple, grâce à ses réservoirs de stockage et de pallier ainsi à des coupures de réseau intempestives.
- Elle ne produit pas de déchets – contrairement à l'énergie nucléaire qui en produit un certain nombre à hauts potentiels toxiques.
- L'hydroélectricité est issue d'une source d'énergie verte, Elle n'émet de gaz à effet de serre, elle préserve donc la planète du réchauffement climatique

- Les centrales hydroélectriques participent au développement économique et touristique des zones d'habitations où elles sont implantées.

4.3. LES INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

- L'énergie hydraulique suppose la construction d'installations de barrages avec un fort impact sur les écosystèmes environnants. La faune et la flore de ces cours d'eau sont directement impactés par la construction d'une retenue d'eau artificielle – avec la disparation de certaines espèces animales ;
- Idem pour la construction de réseaux de lignes électriques qui donnent lieu généralement à d'autres constructions telles que des routes et l'installation de poteaux ;
- La construction des infrastructures hydrauliques prend de la place et est souvent à l'origine de déplacements de populations ;
- Les zones d'exploitation de l'énergie hydraulique sont limitées à des endroits montagneux. Or, la plupart de ces zones sont déjà exploitées et dotées de centrales de lacs. Cette limitation réduit le développement de cette énergie renouvelable et de fait l'augmentation de sa part dans le mix énergétique français. Problématique, lorsqu'on sait les intentions du gouvernement de réduire la production d'électricité issue du parc nucléaire de 50% d'ici 2050 et le recours aux énergies fossiles de 30% d'ici 2030 ;
- La production hydroélectrique demande de lourds investissements de capitaux ;

Dans les paragraphes suivants, je présente l'énergie solaire. En tant que source, elle est unique, le soleil mais en terme d'applications et type d'énergie produite, elle est immense. C'est pour cela que dans ma présentation, en ce qui concerne l'énergie solaire, et devant la multitude de possibilités offertes par le soleil pour produire de l'énergie, j'ai choisi de présenter l'énergie solaire en différents paragraphes indépendants, classé par nature de procédés utilisés et type d'énergie produite.

Les différentes productions d'électricité solaire reposent sur deux technologies, La technologie des modules photovoltaïques utilise des propriétés des semi-conducteurs. La seconde technologie est celle des centrales hélios thermodynamiques ou centrales solaires thermique. [16]

Enfin, je terminerai cette brève présentation de l'énergie solaire par une présentation du potentiel solaire offert par l'Algérie.

5. L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Produire de l'eau chaude grâce au soleil est un principe simple dont la technique est aujourd'hui fiable et éprouvée.

5.1. LE SOLAIRE THERMIQUE BASSE TEMPERATURE

Les rayons du soleil via des capteurs thermiques, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur.

Ce mode d'énergie est utilisé souvent dans tous les principaux chauffagistes, le chauffe-eau solaire au niveau des maisons ou foyer. Mais aussi alimenter un système ayant la double fonction de chauffage et de production d'eau chaude : le système solaire combiné (SSC), aussi appelé "combi". D'une façon générale, un chauffe-eau solaire couvre entre 40 et 80 % des besoins en eau chaude, et un SSC de 25 à 60 % des besoins en chauffage et en eau chaude [17], les différents types de ces systèmes :

- Le chauffe-eau solaire monobloc associe, sur un même châssis, capteur et ballon d'eau, ce qui le rend difficilement intégrable. Il fonctionne sur le principe du thermosiphon et, dénué d'électronique, il est d'une grande simplicité. Il est adapté aux faibles besoins d'eau chaude et à la toiture-terrasse. On l'installe beaucoup dans les pays chauds.
- Le chauffe-eau solaire en thermosiphon peut aussi être réalisé avec capteurs et ballon séparés. Son usage est, de fait, limité par les contraintes techniques. Il faut une différence de 15 °C entre les capteurs et le ballon pour que le fluide circule. Le ballon doit se trouver au-dessus des capteurs. Si le ballon est situé à l'extérieur, les performances du système sont réduites en hiver, à cause des déperditions de chaleur. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés est le système le plus répandu en France. Il affiche une meilleure performance. Séparés, capteurs et ballon peuvent s'intégrer au mieux à la construction. Toutefois, la distance la plus courte entre les éléments est aussi la meilleure afin d'éviter les pertes de chaleur.

5.2. LE SOLAIRE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE

La concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. Selon les différentes technologies de captage, la chaleur produite est généralement comprise entre 400 °C et 1000 °C. On distingue deux usages principaux :

- La production de chaleur (thermique),
- La production d'électricité (thermodynamique).

Dans leur principe, les concentrateurs optiques superposent en un même point des rayons solaires collectés sur une surface de captage, le plus souvent formée de miroirs. Différentes géométries de concentrateurs ont été expérimentées. Ils sont dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur ou en hauteur et en azimut.



Figure 1.5 : Exemple de la solaire thermique haute température

Les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non-concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus. [18]

5.3. LES CENTRALES SOLAIRES A CONCENTRATION

Dans **les centrales solaires à concentration**, on peut produire de grandes quantités d'électricité. Cette filière, promue dans les années 1970, a été délaissée à la suite du contre-choc pétrolier de 1986. Aujourd'hui, elle intéresse à nouveau les industriels, les investisseurs et les compagnies électriques, car elle est source de kilowattheures propres et participe ainsi à la lutte contre l'effet de serre. En concentrant l'énergie solaire, on obtient une température très élevée qui permet de produire de la vapeur. En faisant tourner une turbine, la vapeur génère de l'électricité destinée au réseau électrique. C'est l'hélio thermodynamique, soit l'art de produire de l'électricité avec la chaleur du soleil [18]

Les fours solaires à concentration sont destinés à la recherche (chimie des matériaux, reconstitution de l'entrée d'objets dans l'atmosphère, etc.). Ils produisent uniquement de la chaleur haute température. Cette technique utilise un champ d'héliostats orientables et un grand miroir parabolique fixe, qui renvoie les rayons sur un récepteur. Le four solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées-Orientales, concentre le soleil 10 000 fois. À Mont-Louis, non loin de là, un ancien four expérimental sert aujourd'hui à des démonstrations pédagogiques et à la cuisson de céramiques.

5.4. LE MARCHÉ INTERNATIONAL DU SOLAIRE THERMIQUE

Quels sont les acteurs internationaux majeurs dans le développement de la filière solaire thermique : [18]

Les États-Unis, pays berceau de la filière, concentrent aujourd'hui quasiment toute la puissance héliothermodynamique installée dans le monde avec 355 MWe. Quatre États américains sont particulièrement engagés dans le développement de nouveaux projets : le Nevada avec 64 MWe qui seront mis en service courant 2007 (sociétés Acciona et Solargenix), la Californie où 2 contrats ont été signés pour développer 800 MWe entre 2008 et 2011, l'Arizona et le Nouveau-Mexique.

La renaissance de la filière est aussi désormais portée par l'Espagne, qui s'est fixé un objectif de 500 MWe pour 2010. Forte de l'expérience issue de ses premiers sites héliothermodynamiques localisés à Almeria, le pays a inauguré la première centrale commerciale

à Séville en 2006 (PS10 avec 11 MWe). La prochaine est attendue pour 2008 en Grenade (Andasol 1 avec 50 MWe). Au total, plus de 1 500 MWe sont en projet. [19]

Du côté de l'Allemagne, plusieurs industriels et bureaux d'études travaillent sur des techniques destinées à être développées dans des pays du Sud : Schott a ouvert une usine de production pour équiper des centrales solaires en construction, Schlaich Bergermann und Partner (SBP) participe au développement du collecteur parabolique Eurodish, dont 7 exemplaires de 10 kW fonctionnent en Europe et en Inde.

Une dizaine de projets de centrales hélio-thermodynamiques sont à l'étude ailleurs dans le monde : Mexique, Algérie, Iran, Afrique du Sud, Australie, Egypte, Maroc...

5.5. CHAUFFAGE SOLAIRE ET EAU CHAUDE SANITAIRE

5.5.1. LE CHAUFFAGE SOLAIRE

L'énergie solaire peut assurer près de la moitié des besoins de chauffage et donc permettre autant d'économies sur la facture. Le complément de chauffe peut se faire avec n'importe quelle autre source d'énergie. [20]

L'installation d'un système de chauffage solaire est adaptée lors d'une construction ou d'une rénovation importante du bâtiment.

La surface de capteurs solaires nécessaire est comprise entre 10 et 15 % de la surface de l'habitation à chauffer. Ainsi, par exemple pour une maison de 110m² à Grenoble, habitée par 4 personnes, 16m² de capteurs seront nécessaires. Ils permettront d'économiser chaque année 5 500 kWh (de 1 à 1,5t de CO₂ environ selon l'énergie substituée) et de réaliser une économie de l'ordre de 40% sur la facture de chauffage et d'eau chaude. [20]

5.5.2. L'EAU CHAUDE SANITAIRE

Le chauffe-eau solaire est un dispositif simple qui transforme l'énergie solaire en chaleur pour produire de l'eau chaude sanitaire grâce à des capteurs thermiques. Il existe plusieurs modèles de chauffe-eau solaire en fonction de l'utilisation que l'on souhaite en avoir, de ses besoins, et des conditions climatiques.

Le chauffage de l'eau thermique peut être complété par d'autres systèmes d'énergies si nécessaire.

6. L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire photovoltaïque –provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux “semi-conducteurs”, qui ont comme propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. Dans le cas du photovoltaïque, cette énergie est apportée par les photons, les composants de la lumière, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant le courant électrique.

Les panneaux photovoltaïques ont un fonctionnement différent des capteurs solaires thermiques. Un module photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques. Ces composants électroniques sont généralement à base de silicium, un matériau dit « semi-conducteur » qui produit de l'électricité lorsqu'il est éclairé. Plusieurs technologies de fabrication existent pour les cellules : la cellule cristalline est la plus représentative, elle est déclinée en 2 versions MONOCRISTALLINE et POLYCRISTALLINE qui dépendent du processus de dépôt du silicium sur le support, L'effet photovoltaïque a été découvert par Becquerel en 1839. Les photons de la lumière solaire transmettent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur. Ces derniers se mettent en mouvement, créant un courant électrique. Chaque module photovoltaïque est équipé d'un micro-onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif utilisable dans votre logement. L'électricité ainsi produite est utilisée en autoconsommation. Une installation de 25 m² de modules photovoltaïques peut produire en un an environ 2500 kWh, soit l'équivalent de la consommation électrique d'une famille de 4 personnes (hors chauffage, cuisine et eau chaude). Si vous n'avez pas choisi d'être en autoconsommation totale, l'énergie résiduelle est réinjectée dans le réseau public et achetée par un distributeur d'électricité. L'onduleur est alors relié à un compteur spécifique pour en mesurer la quantité.

6.1. LES INSTALLATIONS SUR SITE ISOLE

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau, l'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection. L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC. Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps. Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

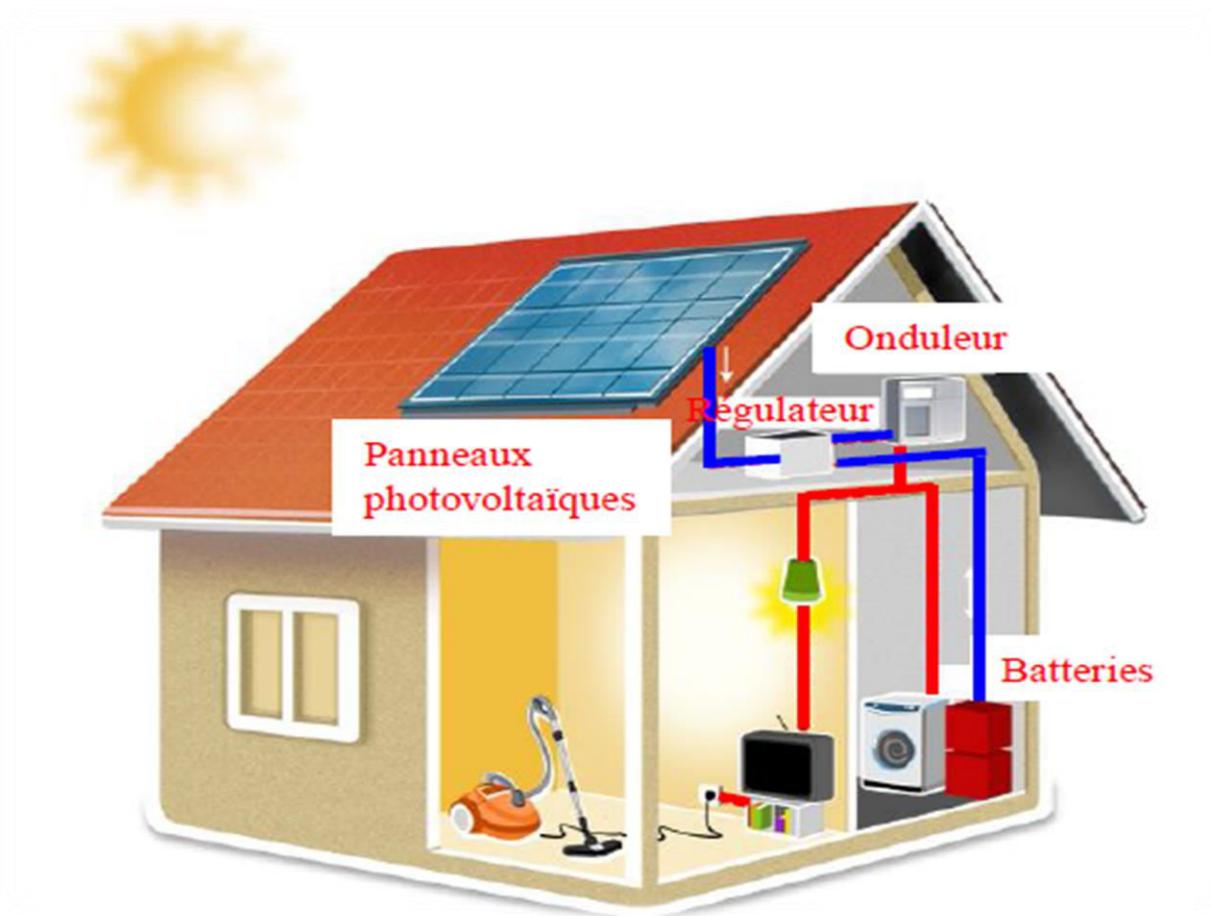


Figure 1.6 : Exemple Les installations sur site isolé

6.2. LES INSTALLATIONS RACCORDEES AU RESEAU DE DISTRIBUTION PUBLIC

6.2.1. SOLUTION AVEC INJECTION TOTALE

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution. Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),

Le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs : l'un pour la production, et l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé)

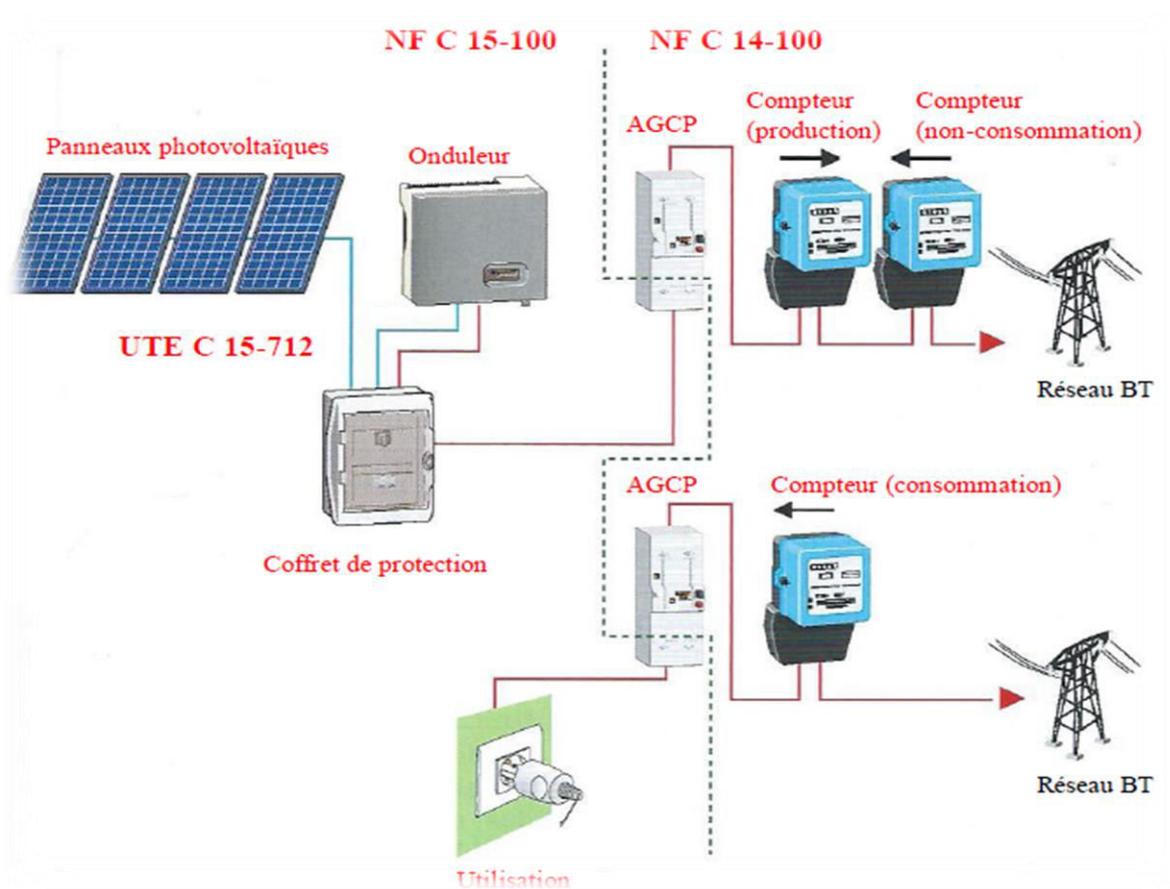


Figure 1.7 : Exemple d'une installations raccordées au réseau injection totale

6.2.2. SOLUTION AVEC INJECTION DE SURPLUS

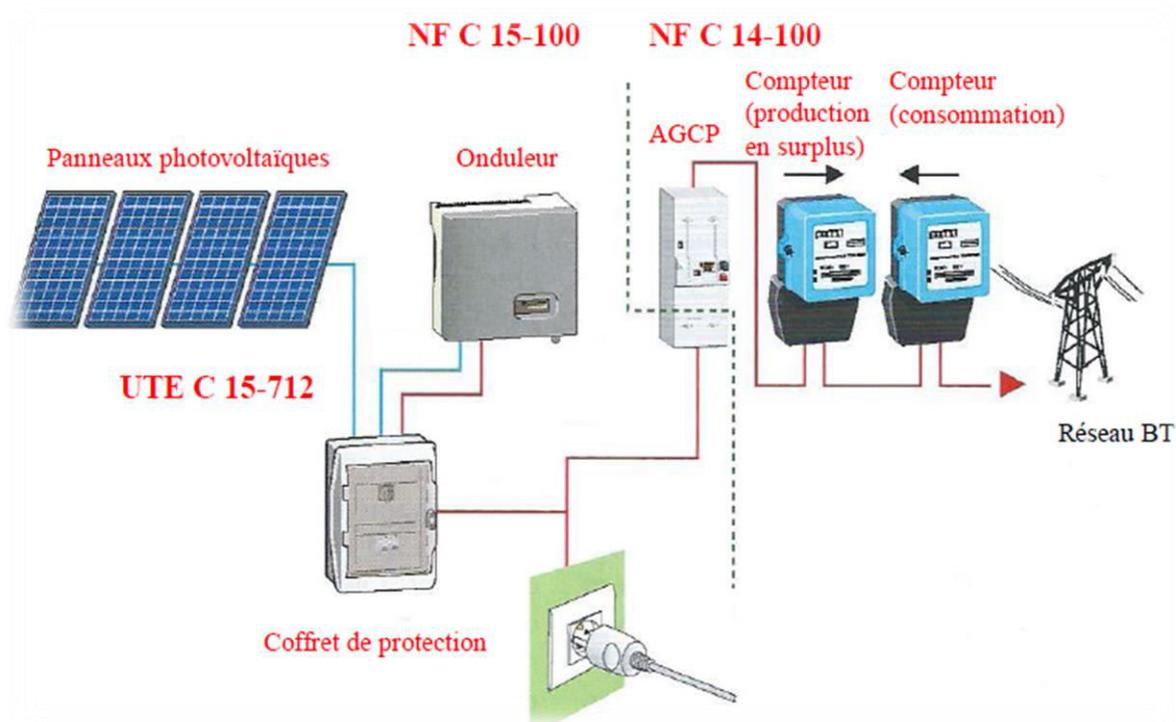


Figure 1.8 : Exemple d'une installations raccordées au réseau injection surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.

7. L'ENERGIE SOLAIRE. POTENTIEL ALGERIEN ET BILAN

7.1. POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE

La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde, Le potentiel solaire de l'Algérie, représentant dix fois la consommation mondiale en énergie, est à même d'assurer l'énergie nécessaire aux différentes applications industrielles, pour peu que les capacités technologiques dans ce domaine connaissent un accroissement significatif. Avec un ensoleillement annuel moyen évalué à 2.000 heures et un territoire composé à 86% de désert saharien, la puissance solaire de l'Algérie est estimée à environ 2.650 KWh/m²/an

dans le sud, ce qui correspond à une capacité électrique 8 fois supérieure aux réserves de gaz naturel du pays, et au plus grand champ solaire du monde.

7.2. EXEMPLE DE REALISATION : LA CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DE GHARDAÏA

Le ministre de l'Énergie, Youcef Yousfi, a inauguré en 2014 à Oued N'chou (10 km au nord de la commune de Ghardaïa) une mini-centrale solaire pilote, Réalisée sur une superficie de 10 hectares, pour un coût global de près de 900 millions de DA, cette mini-centrale, d'une puissance de 1,1 mégawatts (MW), est dotée de 6.000 panneaux photovoltaïques, Fortement respectueux de l'environnement, ce projet permettra aussi de lancer une dynamique de promotion de la recherche spécialisée en matière de développement des énergies renouvelables et constituera un centre d'expérimentation des nouvelles technologies en matière d'énergie solaire, a affirmé le ministre.

Cette mini-centrale constitue ainsi "un laboratoire naturel" pour les études et recherches en matière d'énergie solaire, mais également du matériel utilisé, afin de propager cette technologie à travers le territoire national.



Figure 1.9 : Mini-centrale solaire à Ghardaïa

Premier du genre dans la région, ce projet s'inscrit dans le cadre d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en Algérie, qui vise l'installation d'une puissance d'origine renouvelable devant couvrir 40% de la consommation énergétique du pays à l'horizon 2030, Accompagné du président du groupe Sonelgaz et du Président directeur général de l'entreprise NAFTAL, le ministre a, en outre, mis en service partiellement un raccordement au réseau de gaz naturel de 1.200 foyers dans le nouveau tissu urbain de Bouhraoua, à l'entrée nord de Ghardaïa.[21]

7.3. LES AVANTAGES DE L'ENERGIE SOLAIRE

- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans.

7.4. LES INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.

8. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Un aérogénérateur, appelé souvent éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. d'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuse discipline scientifique et du savoir-faire de la météorologie à l'écologie.[22]

Il existe différents types d'aérogénérateurs que je vais présenter maintenant.

8.1. AEROGÉNÉRATEURS A AXE VERTICAL

Ce type représente la première structure des aérogénérateurs. L'adjectif vertical signifie que son arbre est vertical au sol, on peut classer les éoliennes à axe vertical en deux catégories : les éoliennes lentes et les éoliennes rapides.

Les éoliennes lentes sont principalement utilisées pour le pompage de l'eau. Les machines à trainée différentielle, les machines à écran, les machines à pales tournantes en font partie.[23]

Les éoliennes rapides sont des machines à variation cyclique d'incidence, à aubes fixes et à aubes mobiles, on y trouve le rotor Darrieus et ses dérivés. Ces machines sont essentiellement employées pour la production de l'électricité.

8.1.1. ÉOLIENNE LENTES A AXE VERTICAL

8.1.1.1 Machines à trainée différentielle

Elles présentent l'avantage d'éviter tout dispositif d'orientation du fait de leur symétrie et leur construction est très simple.

Le modèle le plus simple de machines à trainée différentielle est constitué par l'anémomètre à coupelles.

Son principe est comme suit : le mouvement de rotation des machines de ce type est du au fait que l'air en mouvement, exerce sur les corps creux ou dissymétriques, des forces d'intensité très différentes, selon l'orientation des corps par rapport à la direction du vent.

Lorsque le vent souffle sur la partie creuse (concave) d'une demi-sphère, le coefficient aérodynamique C qui intervient dans l'expression de la force agissante est égale à 1.33 et à 0.34 si le courant d'air agit sur la partie convexe.

Pour un demi-cylindre, ces mêmes coefficients s'élèvent à 2.3 et 1.2, du fait de la différence qui existe entre ces coefficients, l'action du vent sur l'ensemble, se traduit par l'apparition d'un couple moteur sur l'axe. La roue se met en mouvement.

8.1.1.2 Turbine LAFOND

La turbine Lafond, est une machine à action différentielle et à flux transversal, l'action aérodynamique est plus importante sur les aubages présentant au vent leur face concave que sur les aubages recevant celui-ci sur leur face convexe. Ajoutons que les filets fluides, déviés une première fois par les aubages se déplaçant dans la direction du vent viennent frapper ensuite les aubages remontant le vent, il en résulte un couple moteur supplémentaire.

8.1.1.3 Rotor de SAVONIUS

Cette machine a été inventée par le finlandais Sigurd Savonius en 1924, elle est constituée de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre, le modèle original était construit avec un rapport $e/d=1/3$, e , désignant l'écartement des bords intérieurs, d , le diamètre des deux cylindres constituant le rotor.

8.1.1.4 Machines à écran et Moulin Persan antique

Pour éliminer la poussée du vent sur les aubages qui remontent le vent, des chercheurs ont eu l'idée de placer devant ceux-ci, un écran orientable, En général cet écran est orienté automatiquement dans la position adéquate à l'aide d'un gouvernail aval mobile autour de l'axe de la machine. Les éoliennes de ce type présentent un rendement maximal

important. Le moulin persan ancien s'apparente aux machines à écran mais l'écran ici n'est pas orientable. Certains étaient équipés de voiles, d'autres de rideaux de roseaux.

8.1.1.5 Éolienne Filippini à rendement optimisé

Cette éolienne à axe vertical qui comporte trois pales constituées chacune d'un demi cylindre suivi d'une plaque plane a été étudiée dans les années 1980, à l'école polytechnique de Thiés (Sénégal) par le Docteur Nguyen Duy Vinh.

Ayant réalisé cinq modèles de l'éolienne, de même diamètre extérieur avec des aubages de même forme mais de tailles différentes, le chercheur a montré par grandement améliorées, par rapport au modèle original conçu par Filippini. A condition de donner, aux paramètres de construction le coefficient C_p pouvait dépasser 0.30 pour une vitesse spécifique $\lambda_0 = 0.7$. Le rendement maximal du rotor optimisé était supérieur à celui du rotor Savonius et presque le double de celui du modèle original.

8.1.1.6 Machines à pales tournantes

Le mouvement des pales est assuré par un mécanisme composé de roues dentées et de chaînes à rouleaux. L'ensemble est orienté à l'aide d'une girouette de façon que l'aubage qui remonte soit situé dans le lit du vent.

La vitesse de rotation des aubages est deux fois plus faible que celle de la roue dentée centrale.

8.1.2. ÉOLIENNES RAPIDES A AXE VERTICAL

8.1.2.1 Le rotor Darrieus

Le rotor Darrieus est une machine à variation cyclique d'incidence à aubes fixes. Il a été conçu en 1931, par l'ingénieur français Darrieus. Ses pales, à profil généralement biconvexe, tournent autour d'un axe vertical et affectent des formes diverses. La surface qu'elles décrivent peut-être cylindrique, tronconique, sphérique ou parabolique. Quel que soit leur aspect, le principe de fonctionnement reste le même.

8.1.2.2 Rotors Darrieus à aubes mobiles

Le cyclogiro ou giromill n'est autre qu'un rotor Darrieus à pales mobiles, la variation d'inclinaison des pales se fait au moyen de tiges guidées dont l'une des extrémités est assujettie à rester au contact d'une came solidaire l'empennage.

8.1.2.3 Système mixte Savonius- Darrieus



Figure 1.10 : Rotor de Savonius

Les essais ont montré que le cyclogiro avait une meilleure efficacité que le rotor Darrieus classique aux basses vitesses. La machine présente en outre l'avantage de démarrer seule mais elle est en raison de sa complexité, plus fragile.

Le rotor Darrieus a l'inconvénient d'exiger pour atteindre son régime normal une impulsion au démarrage, On peut évidemment se servir du réseau électrique pour démarrer le rotor avec le générateur qui fonctionne alors en moteur et reprend ensuite sa fonction normale dès que la vitesse de vent productif est atteinte. Mais on peut également, lancer le rotor Darrieus, à l'aide d'un rotor Savonius.



Figure 1.11 : Rotor Darrieus

8.2. AEROGENERATEURS A AXE HORIZONTAL [24]

Les éoliennes les plus répandues sont à axe horizontal. Dans les machines à axe horizontal, on peut distinguer :

- Les moulins à vent classiques.
- Les éoliennes lentes.
- Les éoliennes rapides

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales, mais il existe d'autres structures à une ou deux pales.



Figure 1.12 : Eolienne à axe horizontal

8.3. LE MOULIN A VENT

On les rencontre principalement en Europe le long des côtes de l'atlantique, de la mer du nord et de la baltique mais aussi en méditerranée.

Les moulins à vent peuvent être classés en deux types principaux :

8.3.1. MOULINS À TOIT TOURNANT

Le toit est prolongé vers le bas par une longue poutre dont la manœuvre permet d'orienter les ailes du moulin face au vent.

Les plus modernes sont orientés à l'aide d'une roue éolienne auxiliaire.

8.3.2. MOULINS À CAGE TOURNANTE

L'ensemble du moulin est placé sur pivot. L'axe de rotation de la roue solidaire de la cage est orienté face au vent par une poutre oblique qui porte l'escalier ou par des éoliennes auxiliaires



Figure 1.13 : Moulin à toit tournant



Figure 1.14 : Moulin à cage tournante

8.3.3. CARACTÉRISTIQUES DES MOULINS À VENT

La longueur des ailes variait habituellement entre 5 et 15m, leur largeur de l'ordre de 1/5 de leur longueur, leurs vitesses de rotation oscillaient de 10 à 40t/min, les valeurs les plus faibles se rapportant aux ailes les plus longues.

8.4. LES ÉOLIENNES LENTES

Pour ce type des éoliennes, les pales dont le nombre varie de 12 à 24, couvrent toute la surface de la roue ou la presque totalité, le gouvernail ou empennage situé en aval, maintient la roue face au vent, Le diamètre des plus grandes éoliennes de ce genre que l'on construit actuellement oscille entre 5m et 8m, Ces éoliennes adaptées aux vents de faible vitesse, démarrent à vide pour des vents de 2 à 3m/s, le couple de démarrage est relativement fort.

Ce type de machine rend cependant d'importants services dans les régions où l'intensité moyenne du vent est de l'ordre de 4 à 5m/s, particulièrement pour le pompage de l'eau.

8.5. LES EOLIENNES RAPIDES

Le nombre de pales est ici plus restreint puisqu'il varie entre 2 et 4.

L'intérêt des éoliennes rapides réside dans le fait qu'elles sont ; à puissances égales, plus légères que les éoliennes lentes, elles présentent par contre l'inconvénient de démarrer difficilement sauf dispositifs spéciaux, il faut un vent de 5m/s au moins pour qu'elles se mettent à tourner.

Les vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

8.6. ELEMENTS DE COMPARAISON EOLIENNES A AXE HORIZONTAL ET A AXE VERTICAL

8.6.1. LES AVANTAGES DES EOLIENNES A AXES HORIZONTAL SONT:

- Leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical.
- L'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent.
- Elles ont un cout important.
- L'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical.

8.6.2. TYPE D'INSTALLATION

Les éoliennes sont regroupées sous forme de fermes éoliennes (parc éolien) raccordées au réseau.

Les installations peuvent être réalisées sur terre « onshore », ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière. Je présente maintenant ces deux types d'installations.

8.7. L'ÉOLIEN ONSHORE

8.7.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉOLIEN ONSHORE

Une éolienne terrestre, ou « onshore », est par définition installée sur la terre ferme et se distingue des éoliennes « offshore » installées en mer. Elle permet de convertir dans un premier temps l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

L'énergie mécanique accumulée peut ensuite être directement utilisée afin de pomper de l'eau ou moulin du grain, comme le font les moulins. Aujourd'hui, dans la grande majorité des cas, l'énergie mécanique est transformée dans un second temps en énergie électrique. Le procédé de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est proche de celui d'une dynamo, convertissant le mouvement d'une roue en électricité alimentant les feux d'un vélo. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut la qualifier d'aérogénérateur.

Les éoliennes à axe horizontal sont aujourd'hui la forme la plus courante d'éolienne terrestre. La machine se compose généralement de 3 pales orientables portées par un rotor, lui-même fixé sur une nacelle qui abrite un générateur électrique. Le tout est installé au sommet d'un mât haut de plusieurs dizaines de mètres. Une éolienne de 2 MW mesure en moyenne de 80 à 125 mètres de haut en moyenne et peut peser jusqu'à 300 tonnes.

Un moteur permet d'orienter l'ensemble rotor-nacelle de l'éolienne afin de le placer face au vent. Le vent fait tourner les pales (entre 5 et 25 tours par minute) qui actionnent le rotor puis le générateur qui leur est solidaire.[25]

8.7.2. LES DEUX MODES D'EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE TERRESTRE

- **Utilisation industrielle dans le cadre d'un parc éolien :** un ensemble d'aérogénérateurs est regroupé sur un même site qui est relié au réseau électrique.
- **Utilisation domestique dans le cadre du « petit éolien » :** des éoliennes terrestres de plus petite envergure peuvent également répondre aux besoins de particuliers ou petits producteurs agricoles. Les éoliennes utilisées dans ce cas fonctionnent selon les mêmes principes de conversion de l'énergie cinétique du vent. Leur puissance varie généralement entre 0,1 et 36 kW et la hauteur de leur mât est inférieure à 35 m². Ces

éoliennes peuvent alimenter des bâtiments isolés non reliés au réseau électrique ou bien être raccordées au réseau afin de revendre la production.



Figure 1.15 : Eolienne onshore

8.8. L'ÉOLIEN OFFSHORE

8.8.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉOLIEN OFFSHORE

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Le terme anglais « offshore » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « onshore ». Les éoliennes offshore fonctionnent selon le même principe que les modèles terrestres traditionnels : elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur.

Le vent fait tourner des pales, généralement trois. Celles-ci entraînent un générateur qui transforme l'énergie mécanique créée en énergie électrique, suivant le principe d'une dynamo. La différence principale entre un modèle marin et un modèle terrestre d'éolienne tient à la nature des fondations, qui lui permettent d'être fixée dans le sol ou ancrée au fond de la mer (sauf dans le cas des éoliennes « flottantes »). Les éoliennes offshore doivent également être très robustes afin de résister aux conditions marines difficiles.

Les éoliennes offshore sont le plus souvent rassemblées dans un « parc éolien » ou « ferme éolienne » comportant généralement entre 20 et 50 éoliennes de 2 à 6 MW. Les parcs offshore traditionnels ne sont généralement pas installés dans des zones où la profondeur dépasse 40 mètres.

Certaines installations « farshore » c'est-à-dire au large (plus de 30 kilomètres des côtes), dotées de bases flottantes, sont aujourd'hui en phase de conception.[26]

8.8.2. FONCTIONNEMENT TECHNIQUE OU SCIENTIFIQUE



Figure 1.16 : Eolienne offshore

Les éoliennes offshore sont spécialement conçues pour résister à la corrosion. Elles possèdent également des capteurs spécifiques pour un contrôle accru. La nacelle et la tour sont équipées de systèmes de contrôle et de régulation de l'humidité et de la température pour éviter tout risque de corrosion interne. La nacelle est équipée de deux grues hydrauliques permettant la manutention d'outils et de pièces de rechange en tout point de l'éolien.

9. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE. POTENTIEL ALGERIEN ET BILAN

9.1. LA FERME ÉOLIENNE D'ADRAR

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité est implantée dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar.

Ce parc éolien a été mis en service début juin 2014 et officiellement inauguré le 03 juillet 2014. Il est composé de 12 éoliennes type Gamesa G52. La puissance de chaque éolienne est de 850 kW (totalisant ainsi 10.2 MW pour le parc éolien) et leur diamètre est de 52 mètres.

La hauteur du mât est de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. D'un coût global de 2,8 milliards de dinars, le projet a été exécuté par deux filiales du groupe SONELGAZ sous la supervision de CEGELEC (ENERGA pour le Génie Civil et ETTERKIB pour le montage d'équipements) [27] [28].

L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Les enregistrements des performances des éoliennes ont montré que la production d'électricité avait atteint certains jours la puissance nominale de la ferme (i.e. 10.2 MW).

Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. Le contrôle est assuré par un système SCADA, la communication entre les éoliennes et la salle de contrôle étant assurée par des câbles en fibre optique. La ferme éolienne de Kaberten est la première réalisation de ce type en Algérie. C'est donc une ferme pilote dont le retour d'expériences est attendu par tous et notamment le comportement des éoliennes sous de hautes températures ainsi que sous l'influence des vents de sable.



Figure 1.17 : Ferme éolienne verticale d'Adrar 10 (MW)

9.2. LES AVANTAGES DE L'ENERGIE EOLIENNE

- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.

9.3. LES INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Actuellement, les installations d'éolienne pour la production de l'électricité ne bénéficient plus de crédit d'impôt (en 2020). Les dernières mesures en ce sens, en France, ont été supprimées par la réglementation datant de fin 2015.

10. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté globalement les énergies renouvelables l'histoire de chaque énergie puis les différents types d'exploitation de ces énergies dites vertes.

La biomasse et l'hydraulique sont moins intéressantes pour un pays comme l'Algérie à cause du manque des ressources de ces énergies, Tandis que l'énergie solaire est l'énergie la plus puissante à cause de la géographie algérienne, L'énergie géothermique ça apparait vraiment satisfaisante à cause de nombre important des sources thermales sous terre. Enfin l'énergie éolienne est acceptable si on analyse le potentiel algérien et la nature de l'exploitation de cette énergie qui est classique et facile pour la production électrique.

11. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE I

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/eolienne>.
- [2] A. Omri, « Analyse de la transition vers les énergies renouvelables : Risques, enjeux et stratégies à adopter » ; Thèse de doctorat, Université côte d'azur, Septembre 2016.
- [3] Moulin à vent. Planche IV. Article Agriculture. Extrait de VEncyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers de Denis Didero.
- [4] A. Missaoui, « Etude de la conversion de la biomasse en énergie par un procédé hydrothermal de carbonisation - Caractérisation des produits issus des grignons d'olive »; Thèse de doctorat, Université d'orléans, Novembre 2018.
- [5] M. Balat, E. Kirtay, and H. Balat, Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. Energy Convers. Manag. 50, 3147–3157, (2009).
- [6] P. Mckendry, Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresour. Technol. 83, 37–46.2002.
- [7] O. Boutin, « analyse des processus primaires de dégradation thermochimique de la biomasse », Thèse de l'institut national polytechnique de lorraine, 1999.
- [8] Quinzième inventaire réalisé par Obser'ER et la fondation Energies pour le monde.
- [9] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>
- [10] D. Kpogbemabou, « Procède de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement déstructurée ». Thèse de l'université de Poitiers, Aout 2006.
- [11] M. Ndiaye, « ETUDE DE LA géothermie ET PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE », PFE universite cheikh anta diop de dakar, Juillet 2004.
- [12] I. Benchemsa, « L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique », Mémoire Université de Annaba, Algérie 2017
- [13] B. Ferrah, « Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien) », Mémoire Université de Annaba, Algérie, 2014.[14] S.M. Boudia. « Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » ; Thèse de l'université de Tlemcen, Janvier 2013.

- [15] O. Fezazi, « Commande prédictive d'une machine asynchrone doublement alimentatée dédiée aux énergies renouvelables », Thèse de l'université Djillali liabes, Sidi Bel Abbes, Septembre 2017.
- [16] Web : Agence locale de l'énergie et du climat, grande région grenobloise.
- [17] <http://www.energies-renouvelables.org/accueil-observ-er.asp>.
- [18] A. Kettal, « Amélioration des performances d'un système éolien par l'introduction d'une source solaire » ; Mémoire de l'université Saad Dahleb de Blida, 2018.
- [19] <https://www.solisart.fr/synthese-barometre-euroserver-solaire-thermique-2019>.
- [20] E. Ghanassia, « Effets de la morphologie des bâtiments en zones urbaines sur le gisement physique en énergies renouvelables » ; Thèse de l'université de technologie Compiègne 2012, Juin 2012.
- [21] Énergie solaire en Algérie : Un nouveau projet qui verra bientôt le jour ; Mohammed Djeddis 2018
- [22] L. Beaudet, « Etude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne à axe vertical de forte solidité » ; Thèse de l'université de poitiers, Juillet 2014.
- [23] <https://www.energie-online.fr/eolien/guide/types-eoliennes.htm>
- [24] Desire Le Gourieres, Livre : Les éoliennes, Théorie, conception et calcul pratique, 2008.
- [25] Wiki Eolien/ installation/ fondation, site web.
- [26] Eoliennes en mer, Dieppe et Le Tréport, fiche thématique, les différents types de fondations existants, 2016.
- [27] Ministère de l'Énergie site web
- [28] L'Énergie éolienne en Algérie Un bref aperçu, Dr Ouahiba GUERRI, Directrice de la Division Énergie Éolienne, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 2011

CHAPITRE II

L'énergie éolienne

Chapitre II

L'énergie éolienne

SOMMAIRE DU CHAPITRE II

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE II	61
1. INTRODUCTION.....	63
2. LE VENT	65
3. PRODUCTION EOLIENNE DE L'ELECTRICITE	69
4. ELEMENTS MECANIQUES DE L'EOLIENNE	70
5. ELEMENTS ELECTRIQUES ACTIFS DE L'EOLIENNE.....	77
6. LA GENERATRICE.....	78
7. LES CONVERTISSEURS D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ASSOCIES	84
8. SYNTHESE DE DIFFERENTS TYPES DE GENERATEURS EOLIENS	85
9. L'EOLIENNE ANELION SW 3.5-GT.....	86
10. CONCLUSION	91
11. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE II.....	92

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE II

Figure 2.1: Rose des vents	65
Figure 2.2: Ensemble d'un anémomètre et une girouette	65
Figure 2.3: Anémomètre Papillon-Robinson	68
Figure 2.4: Enregistrement anémométrique d'un modèle réel du vent.....	68
Figure 2.5: Variation de température sur la surface du globe	69
Figure 2.6: Déférents éléments d'une éolienne à axe horizontal	71
Figure 2.7: Fondation de l'éolienne	72
Figure 2.8: Type Fondation offshore : a) la fondation monopieu b) la fondation gravitaire c) la fondation en structures jacket.	73
Figure 2.9: Contrôle du calage des pales sur une maquette.....	76
Figure 2.10: Moteur : a) moteur pour commande de nacelle b) moteur pour commande de pitch c) servomoteurs Brushless CA.....	78
Figure 2.11: Chaîne éolienne utilisant la machine asynchrone	80
Figure 2.12: Chaîne éolienne utilisant une génératrice à courant continue	80
Figure 2.13: Chaîne éolienne utilisant une génératrice synchrone	81
Figure 2.14: Eolienne Anelion (laboratoire LMOPS Thionville).....	86
Figure 2.15: les différents éléments de l'Anelion	88
Figure 2.16: Vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent	89
Figure 2.17: Caractéristiques Puissance/Energie – V_{vent} de l'éolienne Anelion.....	90

1. INTRODUCTION

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier, L'énergie éolienne est employée pendant longtemps dans les fermes pour rectifier les grains ou l'eau de pompe sous forme de moulin de vent. Le principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Aujourd'hui, ce principe est appliqué à l'énergie éolienne dans le système d'alimentation, mais on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs.

L'histoire nous apprend que les moulins à vent existant déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine, c'est seulement au moyen âge, que les moulins à vent font leur apparition en Italie, en France puis en Espagne et au Portugal. On les rencontre un peu plus tard en Grande-Bretagne, en Hollande et en Allemagne. Certains auteurs suggèrent que leur introduction en Europe est due Croisés revenus du Moyen-Orient.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. Les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne. Dans ce chapitre on va étudier précisément la situation de l'énergie éolienne dans le vieux temps ainsi que dans le présent, ainsi que les différentes machines utilisées pour la transformation de cette énergie, et le modèle d'aérogénérateur existant dans notre laboratoire et dans lequel on a réalisé notre travail de thèse. Ainsi que la source initiale pour produire de l'électricité à l'aide d'un aérogénérateur.

1.1. UN PEU D'HISTOIRE

Le vent fut avec l'eau la première source d'énergie exploitée par l'homme, le moulin à vent d'abord apparu en Orient, en Egypte ancienne en Iran, et il fut exploité en Perse pour l'irrigation dès l'an 600 avant J.C, les ailes sont disposées radialement sur un axe vertical. L'idée de ce type de moulin sera par les Arabes en Occident, ou le dispositif à axe horizontal sera adopté. L'utilisation du moulin à vent se généralise en Europe à partir du Xe siècle dans

les zones les plus favorables, et elle connaît un certain succès, en particulier auprès des meuniers qui s'en servent pour la fabrication des farines.

Sept cents ans avant notre ère, les perses reprennent astucieusement le principe de la navigation à voile pour construire les premiers moulins à vent, Par la suite, on les retrouve en Occident à partir du X^e siècle, ils remplacent avantageusement les meules à bras pour broyer les céréales et les plantes (principalement pour la fabrication d'huile) ou encore pour pomper efficacement l'eau. Les moulins iraniens étaient quant à eux constitués d'une éolienne à axe vertical confinée à l'intérieur du moulin. Cette technique offrait de meilleurs rendements que les éoliennes à axe horizontal, répandues en Europe.

Propriétés des grands seigneurs, les Moulins à vent sont à cette époque confiés à l'expertise des maîtres meuniers.[1]

1.2. LA PLACE DE L'ENERGIE EOLIENNE DANS LE MIXTE ENERGETIQUE MONDIAL

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences sur le monde entier, le marché mondial de l'éolien a pu résister. Le chiffre d'affaires du secteur éolien dans le monde entier a atteint le 60 milliard d'euros (75 milliards de dollars) en 2012, après 50 milliards d'euros en 2011. En effet, en 2012 près de 100 pays ont installés des capacités d'énergie éolienne sur leur territoire, parmi eux 34 pays européens davantage que sur n'importe quel autre continent. Le rythme de croissance de l'éolien dans le monde reste globalement soutenu, selon le rapport annuel de l'association mondiale de l'énergie éolienne (World Wind Energy Association - WWEA) publié en mai 2013 [19], la puissance éolienne mondiale installée durant l'année 2012 est de l'ordre de 44609MW, soit une puissance mondiale cumulée de plus de 282GW.

La plus grande partie de la puissance installée se trouve en Europe avec environ 107GW et qui représente 38% de la capacité éolienne mondiale, dont plus de 98.5% de cette puissance est localisée uniquement à l'Union Européenne. En Europe, cette filière assure déjà la consommation électrique de 30 millions de foyers (c'est à dire 6.3% de la demande d'électricité) et permettrait d'éviter la production de 140 millions de tonnes de gaz carbonique par an, soit l'équivalent de la circulation de 33% des voitures de l'Union Européenne selon l'EWEA (European Wind Energy Association).[20],[21]

En ce qui concerne l'Algérie, l'énergie éolienne n'est pas encore connue à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement éolien dont dispose l'Algérie [22]. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique. Un premier pas a été déjà fait par le groupe Sonelgaz en 13 décembre 2010, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne de Kabertène à Adrar d'une puissance totale de 10MW (chapitre 1). Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014.

2. LE VENT

2.1. GENERALITES

Le vent souffle en principe dans des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions, aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre, le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire, dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des aires anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

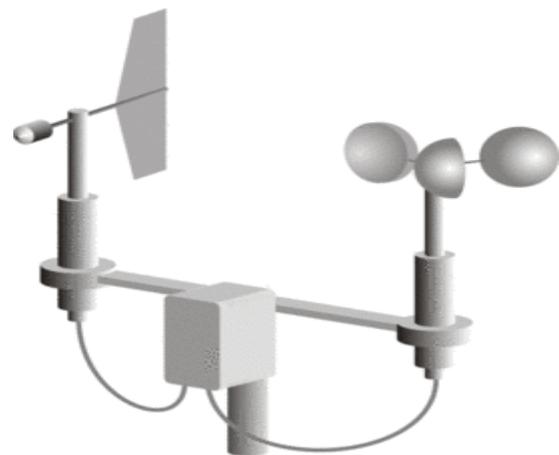
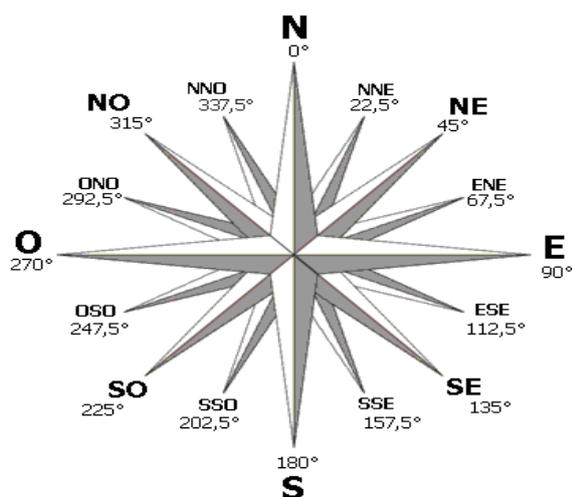


Figure 2.1: Rose des vents Figure 2.2: Ensemble d'un anémomètre et une girouette

On repère la direction du vent par le côté d'où il souffle. On dit que la direction du vent est ouest si le courant d'air vient de l'ouest. Cette direction nous est indiquée par la gi-

rouette, En pratique, les stations météorologiques un peu importantes disposent de girouettes élaborées qui permettent l'enregistrement permanent et simultané de la direction et de la vitesse du vent. [2]

Les observations effectuées montrent que la direction du vent varie permanence autour d'une direction moyenne.

2.2. LES MESURES ANEMOMETRIQUES

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. il en existe plusieurs types. On peut les classer en quatre catégories principales : Les anémomètres à rotation, à pression, à variation de résistance (fil chaud) et à ultrasons.

2.2.1. ANEMOMETRES A ROTATION

Les types les plus connus sont les anémomètres à coupelles de papillon et Robinson, l'anémomètre à ailettes obliques de Jules Richard et l'anémomètre à gouttières d'Ailleret construit par la compagnie des Compteurs. Les premiers équipent pratiquement toutes les stations météorologiques, ils sont généralement insensibles aux vents de vitesse inférieures à 1m/s tandis que l'anémomètre Richard plus sensible est surtout un appareil de laboratoire.

L'anémomètre Ailleret a été spécialement conçu pour la mesure de l'énergie éolienne. On peut lui associer un compteur ou un enregistreur qui indique directement l'énergie théoriquement utilisable.

2.2.2. ANEMOMETRE A PRESSION

Nous citerons l'anémomètre à boule et à cadran, les anémomètres à tube de Pilot (exemple l'anémomètre Dines), les anémomètres à rafales ERA de l'Electrical Research Association et l'anémomètre Best-Romani, ces anémomètres ont été conçus pour mesurer les vents d'intensité rapidement variable.

Dans les anémomètres ERA, la traînée du vent s'exerçait sur les sphères et provoquait des déplacements horizontaux ou verticaux, l'anémomètre Best Romani qui a été utilisé en France, comportait un cylindre rugueux, La force qui agissait sur le cylindre, était déterminée en grandeur et direction à l'aide de galvanomètres enregistreurs. Ceux-ci rece-

vaient le courant en provenance de jauges à résistance collées sur les parois du noyau cylindrique au-dessous du cylindre rugueux, suivant des génératrices situées dans des plans méridiens perpendiculaires entre eux. Les anémomètres Best Romani avaient des constantes de temps inférieures au dixième de seconde et permettaient l'enregistrement de la vitesse presque instantanée.

2.2.3. ANEMOMETRE A VARIATION DE SECTION

Il se compose d'un tube tronconique vertical sur l'axe duquel se meut un disque en plastique léger percé en son centre qui tourne autour d'une tige qui le traverse.

A la base de ce tube sur le côté au voisinage de la petite section se trouve un orifice que l'on oriente en direction du vent, La pression dynamique soulève le disque jusqu'à ce que le poids équilibre les forces aérodynamiques qui diminuent lorsque le disque monte par suite d'élargissement de la section de l'écoulement. La paroi extérieure de l'anémomètre porte une graduation sur laquelle on lit les vitesses.

2.2.4. ANEMOMETRE A ULTRASONS

Ce sont les plus récents et les plus modernes. On peut les classer en anémomètres 2D et anémomètres 3D. Leur fonctionnement est basé sur la mesure de la durée de transmission des ondes ultra soniques entre un émetteur et un récepteur.

- **Anémomètre 2D** : il mesure dans le plan horizontal, la vitesse du vent et indique la direction, il remplace donc à la fois, un anémomètre classique et une girouette.
- **Anémomètre 3D** : il permet le calcul des trois composantes de la vitesse du vent, les composantes horizontales mais aussi la composante verticale, il est utilisé dans les études de turbulence., et il est relié à un ordinateur.

2.2.5. ANEMOMETRE A FIL CHAUD

Il est constitué par un fil conducteur chauffé par un courant électrique et placé dans le vent, le refroidissement du fil par convection fait varier sa résistance. Or le refroidissement est d'autant plus important que la vitesse du vent est élevée. Il suffit de mesurer la

résistance électrique du fil avec un pont de Wheatstone, pour obtenir après relevé de la température du flux d'air, la vitesse du vent.

Les modèles d'anémomètres sont donc très variés, le plus utilisé est sans aucun doute, l'anémomètre Papillon-Robinson.

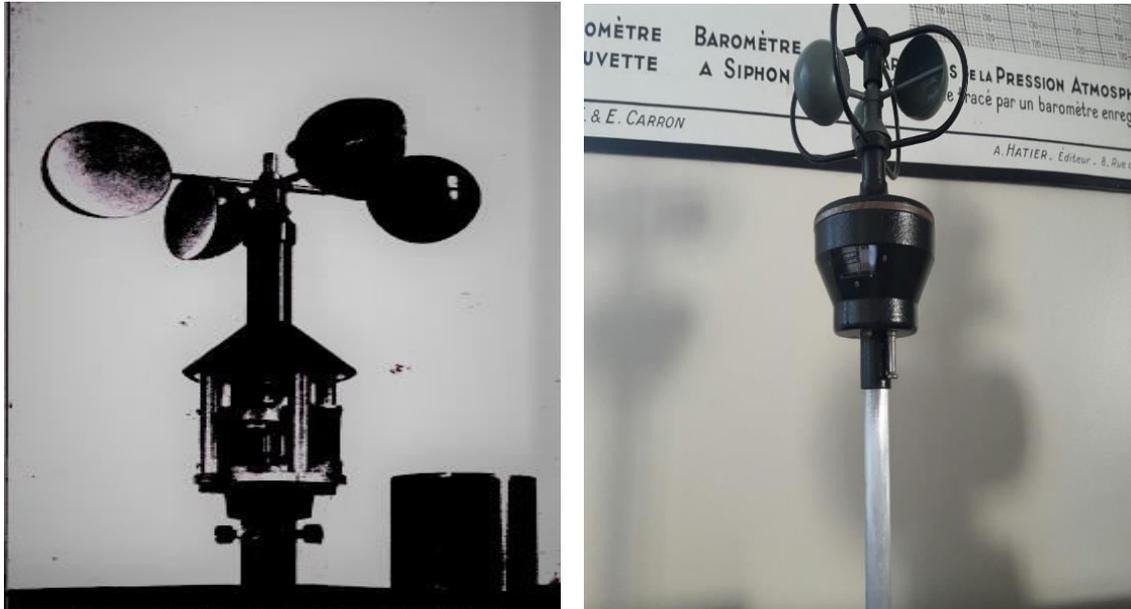


Figure 2.3: Anémomètre Papillon-Robinson

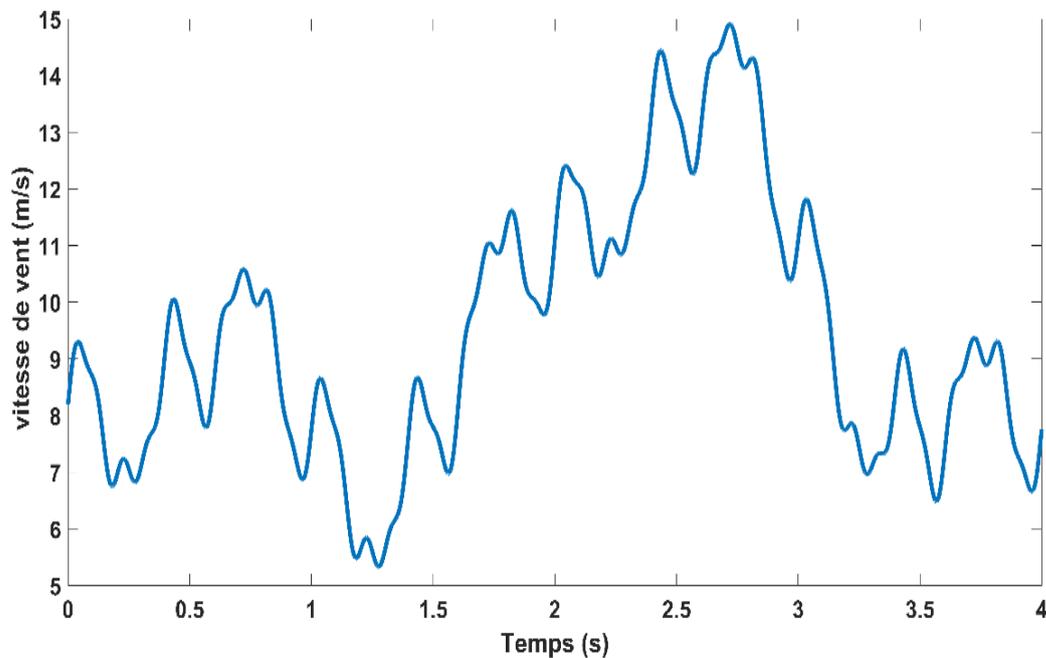


Figure 2.4: Enregistrement anémométrique d'un modèle réel du vent

En pratique les anémomètres à compteur totalisateur qui ont l'avantage d'être économiques, ne sont utilisés que pour les études grossières, pour obtenir les grandeurs fondamentales nécessaires au dimensionnement d'un équipement, on emploie les anémométries précédents couplés à des enregistreurs afin d'avoir en fonction du temps, la variation de l'intensité du vent.

3. PRODUCTION EOLIENNE DE L'ELECTRICITE

3.1. POTENTIEL EOLIEN MONDIAL

Dans la figure suivante, je montre la répartition des gisements éolien dans le monde.

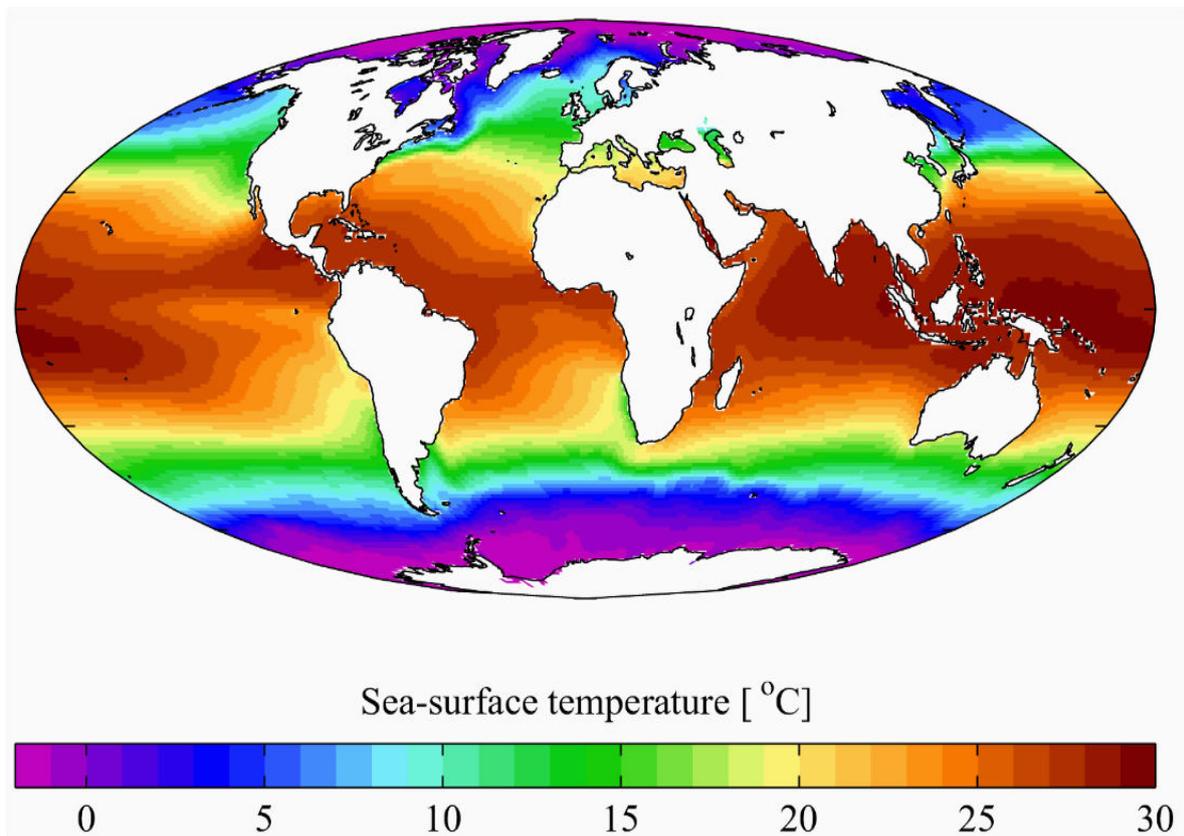


Figure 2.5: Variation de température sur la surface du globe

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe (figure 2.5).

De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie cinétique est transformée en électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs pour les différencier des éoliennes de pompage, soit pour être injectée dans un réseau de distribution soit pour être utilisée sur place (site isolé). [3]

3.2. CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique se fait dans le générateur. Il en existe deux types : générateur synchrone et asynchrone, cependant le principe de fonctionnement est le même. On définit le générateur comme « l'inverse » d'un moteur : là où le moteur produira de l'énergie mécanique à partir d'énergie électrique, le générateur fera le parcours inverse. Le principe d'un générateur, ou alternateur est relativement simple ; il est constitué d'un stator (la partie fixe) et d'un rotor (partie tournante). Le rotor est l'inducteur, celui qui crée le champ électromagnétique en tournant et de ce fait induit un courant ; il est constitué soit d'un aimant soit d'un électroaimant (une bobine). Le stator est l'induit, celui qui reçoit l'induction et la transforme en courant.

La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique repose sur des propriétés des champs magnétiques. On utilise dans un cas l'induction de Von Neumann et dans l'autre celle de Lorentz : ces deux lois provoquent l'apparition d'une force électromotrice dans un circuit grâce à un champ magnétique. Dans le cas de l'induction de Von Neumann, il y a apparition d'un courant lorsqu'un circuit fermé immobile se trouve dans un champ magnétique variable. Dans le cas de l'induction de Lorentz, c'est le circuit fermé qui se déplace dans un champ magnétique constant. Cette force électromotrice est liée à la dérivée du flux ϕ par rapport au temps : [3]

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

4. ELEMENTS MECANIQUES DE L'EOLIENNE

La chaîne éolienne se constitue d'une partie mécanique la turbine et une partie électrique la génératrice, Dans cette partie on va étudier les constitutions mécaniques de l'aérogénérateur de la fondation jusqu'au mécanisme d'entraînement de la génératrice.

4.1. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE HORIZONTAL

Les éoliennes les plus couramment utilisées sont à axe horizontal et sont constituées des éléments ci-dessous : [7]

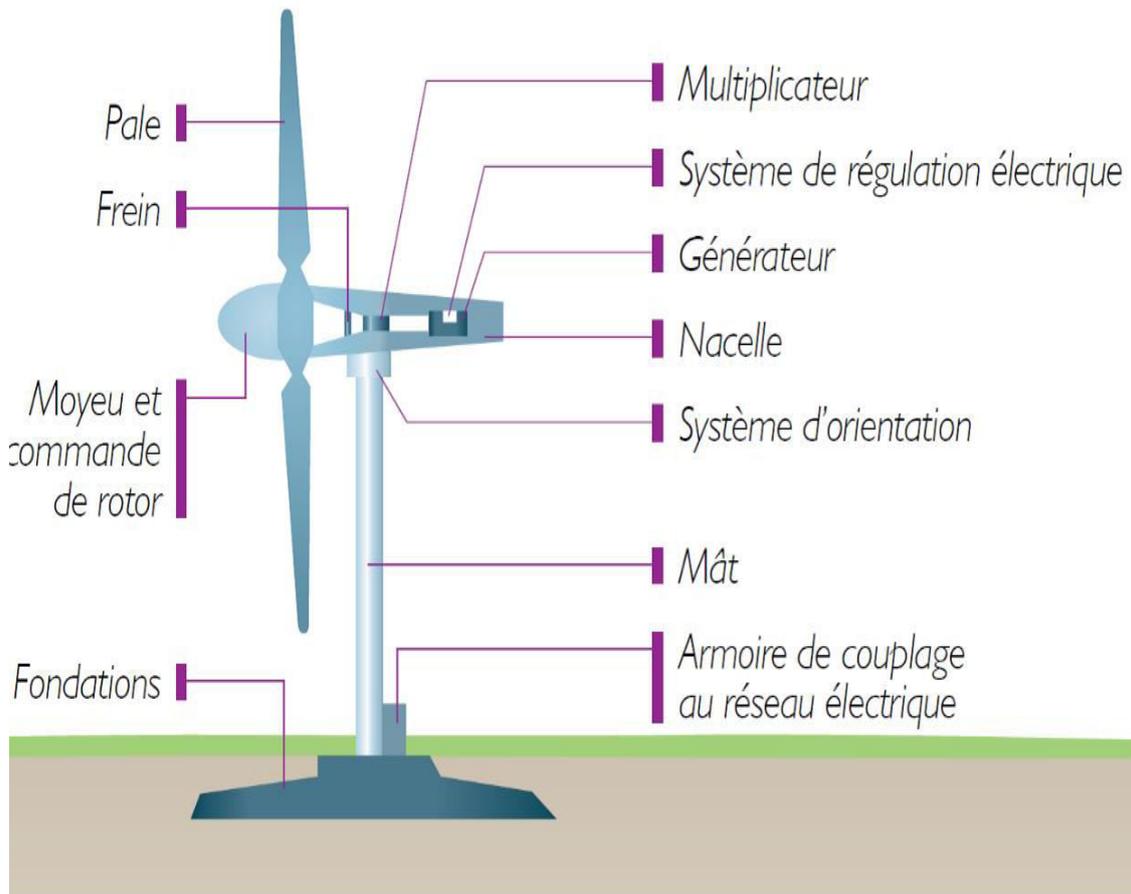


Figure 2.6: Différents éléments d'une éolienne à axe horizontal

- Un mât : Permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol.
- D'hélices : De trois pales généralement, montées sur l'axe horizontal de l'éolienne.
- Une Nacelle : Constituée des composants essentiels à la conversion d'énergie.
- Générateur/convertisseur : Convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Frein : Permettant de stopper l'éolienne en cas de vents forts.
- Moyeu : Reçoit les pales et se monte sur l'arbre lent d'entrée au multiplicateur.
- Multiplicateur : C'est un convertisseur de puissance, il multiplie la vitesse d'entrée pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice.

- Système de régulation : Permet d'éviter une survitesse du générateur.
- Armoire de couplage : Elle abrite un transformateur qui augmente la tension afin de l'injecter au réseau de distribution.

4.2. LES FONDATIONS

Les fondations sont la base d'une éolienne, c'est elles qui devront supporter le poids de l'éolienne. Les travaux de terrassement et la réalisation de fondations sont généralement exécutés par des sociétés locales spécialisées dans le génie civil, La fondation d'une éolienne s'étend sur une surface comprise entre 100 et 300 m^2 selon les modèles et les puissances, et jusqu'à 3,20 m de profondeur pour une éolienne de 2 MW si le sol est stable. Cette emprise au sol est ramenée à moins de 100 m^2 lorsque le chantier est terminé et les fondations recouvertes de terre et d'un empierrement [4].



Figure 2.7: Fondation de l'éolienne

Le volume de béton dans les fondations d'une éolienne est comparable au volume d'une grande maison (de l'ordre de 400 m^3 pour une éolienne de 2,5 MW). Le charroi lié à l'installation d'une éolienne est assuré par environ 100 camions. Le plus souvent, l'accès à un

chantier éolien emprunte les routes et chemins existants : l'impact est ainsi limité et moins coûteux.

Au terme de l'exploitation du parc éolien, chaque éolienne est démantelée. Cela se fait généralement par grue ou, dans certains cas, par implosion de la base du mât. Les deux techniques sont très sécurisées et non polluantes.

4.2.1. FONDATION ONSHORE :

Il existe 2 principaux types de fondations onshore : [5]

- Les fondations superficielles (ou massifs gravitaires), lorsque le sol d'assise est homogène et de bonne portance
- Les fondations sur pieux, lorsque le sol d'assise présente une portance trop faible et que le bon sol se trouve à une profondeur importante, de l'ordre de plus de 15 m.

4.2.2. FONDATION OFFSHORE :

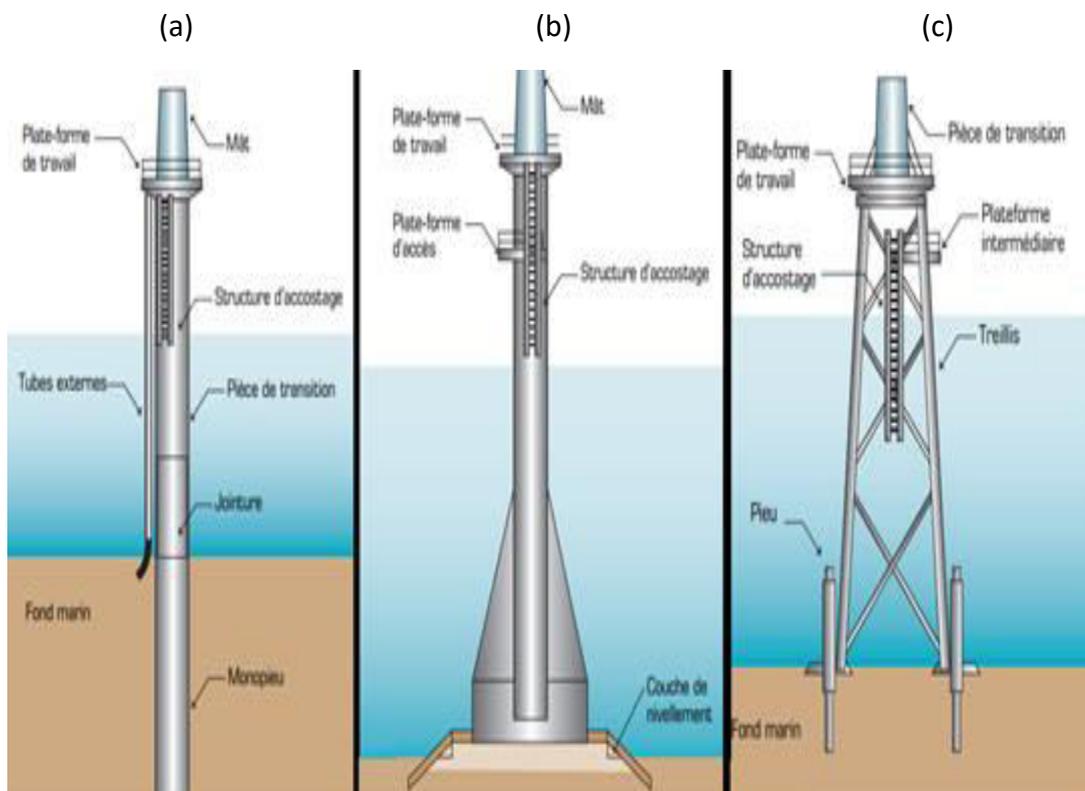


Figure 2.8: Type Fondation offshore : a) la fondation monopieu b) la fondation gravitaire c) la fondation en structures jacket.

Comme le montre la Figure 2.8., il existe 3 principaux types de fondation offshore [6]

- La fondation mono-pieu : Le mono-pieu est la solution la plus souvent sélectionnée pour les projets de parcs récents, installation par Battage, forage du fonds marin ou vibro-fonçage. (Figure 2.8.a)
- La fondation gravitaire : matière de construction est l'acier et/ou béton, installation descendante par grue ou flottaison puis lestage sur site. (Figure 2.8. b)
- La fondation en structures métalliques ou « jacket » : matière de construction est l'acier-tubulaire installation : descente par grue puis ancrage des pieds par des pieux (soit pré-battus/pré-forés soit battus/forés après l'installation) (Figure 2.8.c)

4.3. LES SYSTEMES DE FREINAGE DE L'ÉOLIENNE

4.3.1. REGULATION ET FREINAGE PAR BASCULEMENT DE L'ÉOLIENNE

Le basculement de l'éolienne entraîne une réduction de la surface effective balayée par le rotor. Pour réduire cette surface il faut augmenter l'angle formé par l'axe de rotation du rotor et la direction du vent dominant soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en la faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est "effacé" vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement, Ce dispositif est installé essentiellement sur les petites éoliennes, l'intervention de l'opérateur peut être remplacée et automatisée par action du vent sur une "palette" de commande parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice.

Lorsque la pression du vent sur la palette atteint un certain seuil, celle-ci entraîne la commande d'un frein ou de la mise en drapeau. Cette palette peut être associée à un ressort permettant de replacer l'hélice dans sa position normale lorsque la pression du vent sur la palette diminue. Le passage d'une position à l'autre peut être progressif et l'angle formé par le plan de l'hélice et le vent dépendra de la pression sur la palette (entre 0° : vitesse nominale et 90° : arrêt de la machine). La modification de cet angle modifie les efforts de l'air sur les pales [8].

Ce système peut être utilisé uniquement sur des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante et présente l'inconvénient d'interrompre le fonctionnement de l'aérogénérateur au-delà d'une vitesse de vent limite par exemple sur la majorité des éo-

liennes de pompage pour lesquelles le rendement et la vitesse de rotation ne sont pas importants.

4.3.2. REGULATION ET FREINAGE PAR GOUVERNAIL ARTICULE

À partir d'un certain niveau du vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement en travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force. On parle généralement d'effacement latéral ou de "furling" dans ce cas précis, ceci est très utilisé pour les petites éoliennes car c'est un système très simple à mettre en œuvre.

4.3.3. REGULATION AERODYNAMIQUE [9] PAR PAS VARIABLE

Le pas variable, aussi appelé "pitch control", est un système de régulation aérodynamique actif. Ce système consiste à faire varier l'angle de calage des pales sur le moyeu à l'aide de vérins hydrauliques autour d'un axe longitudinal pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses du vent supérieures à la vitesse nominale. La variation de l'angle de calage entraîne une diminution ou une augmentation de la portance de la pale, donc du couple moteur. Un système de contrôle permet de déterminer la meilleure position des pales en fonction de la vitesse du vent et commande le système hydraulique afin d'exécuter le positionnement, Ce système permet :

- 1)** D'arrêter l'éolienne ou en limiter la puissance afin de la protéger des vents violents en plaçant les pales en drapeau et réduisant ainsi la prise au vent ;
- 2)** De maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer : généralement les pales pivotent de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent de manière à ce que les pales soient toujours positionnées avec un angle optimal par rapport à la direction du vent pour en extraire la puissance maximale, C'est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne, donc de la puissance, mais c'est un dispositif complexe, qui exige davantage d'entretien.



Figure 2.9: Contrôle du calage des pales sur une maquette

4.3.4. REGULATION AERODYNAMIQUE PAR PAS FIXE

La désignation "pas fixe" est impropre car en réalité elle désigne une pale dont le calage est fixe mais le pas varie tout le long de l'envergure de la pale (tout comme le pas variable, la pale est vrillée). Le pas fixe, aussi appelé "stall control", est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor. En effet grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente.

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des petites éoliennes car il ne nécessite pas de pièces mobiles ni de système de régulation dans le rotor, c'est un système simple, fiable et moins coûteux mais il engendre des pertes d'efficacité au démarrage et dans les grandes vitesses du vent. L'utilisation de pales à pas fixe implique un seul point de fonctionnement défini par la vitesse de rotation du rotor et par la vitesse du vent.

5. ELEMENTS ELECTRIQUES ACTIFS DE L'EOLIENNE

Il s'agit principalement des moteurs à courant alternatif permettant le contrôle de la vitesse de rotation de l'éolienne comme des moteurs spéciaux pour le freinage, pitch et de lacet peuvent être trouvés.

5.1. MOTORISATION D'ORIENTATION DES NACELLES (YAW CONTROL)

Ce sont des moteurs ou réducteurs utilisés pour le contrôle de l'angle de lacet (Yaw angle, en anglais) est l'angle de rotation de la Nacelle autour de son axe vertical. Un contrôle efficace de la rotation de lacet est essentiel pour assurer que les éoliennes soient toujours tournées dans la bonne direction (directement confrontées au vent) [10], Les réducteurs permettent d'aligner avec précision la Nacelle avec la direction du vent. Bien que leurs dimensions soient compactes et leur poids faible, ces réducteurs sont extrêmement robustes et jouent un rôle fondamental dans l'exploitation de l'énergie éolienne dans le monde entier [11]. La Figure (2.10.a) représente Motorisations d'orientation de la Nacelle Bonfiglioli 700TW.

5.2. MOTORISATION ANGLE DE CALAGE (PITCH CONTROL)

La motorisation associée à la commande pitch des éoliennes servent le but essentiel de positionner les pales des turbines éoliennes sous le meilleur angle possible pour l'exploitation du vent, pour faire tourner le rotor de la façon la plus performante possible. Les caractéristiques techniques avancées, la conception extrêmement robuste et la capacité de couple élevée font en sorte que ces boîtes de vitesses soient parmi les favorites des fabricants d'éoliennes dans le monde entier. La Figure (2.10.b) représente Motorisations d'orientation et commande de pitch Bonfiglioli 700TW [11].

5.3. MOTORISATION POUR LE FREINAGE

Un système de moteur asservi. Utilisé pour freinage de maintien des moteurs capables de maintenir une certaine vitesse ou un couple bien précis et dont la position est vérifiée en continu et corrigée en fonction de la mesure. La Figure (2.10.c) représente un Servomoteurs Brushless CA séries BCR Bonfiglioli 700TW.

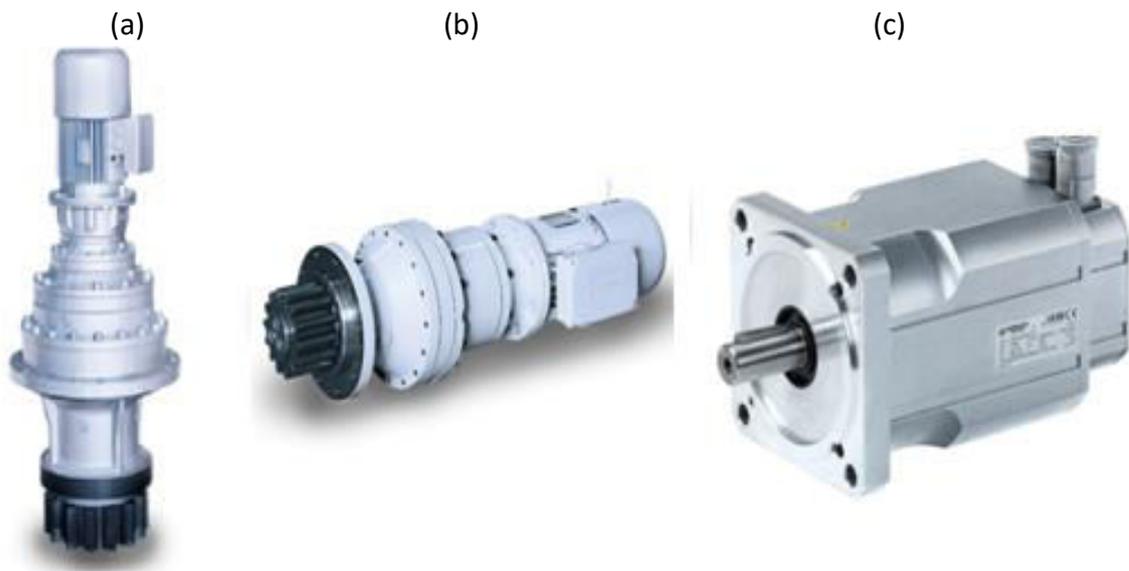


Figure 2.10: Moteur : a) moteur pour commande de nacelle b) moteur pour commande de pitch c) servomoteurs Brushless CA

6. LA GENERATRICE

La génératrice est un élément indispensable pour une éolienne, c'est la partie la plus importante elle nous permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est soit directement sur l'axe de l'aéromoteur, soit entraînée par un multiplicateur. Elle se loge au niveau de la nacelle, le type de la génératrice change suivant l'exploitation, le fabricant et le type de l'éolienne si c'est une éolienne à vitesse fixe ou éoliennes à vitesse variable.

6.1. GENERATRICES ASYNCHRONES UTILISEES POUR LES EOLIENNES

La Machine Asynchrone (MAS) est utilisée dans la plupart des cas car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces variations de vitesses engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduits avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe. La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateurs pour la fourniture d'énergie réactive. La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tours

par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide). Cette chaîne cinétique implique des forces de frottements qui empêchent la rotation du rotor par vent faible, il faut donc vaincre ces forces d'inertie au démarrage grâce à un coup de vent plus important, ce système est simple et utilisé depuis longtemps et économiquement est plus intéressant [12].

La génératrice asynchrone peut être :

6.1.1. À ROTOR BOBINE OU A BAGUES :

Les enroulements du rotor couplés en étoile sont reliés à un système de bagues/balais permettant ainsi l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor. Ici on distingue génératrice asynchrone double alimentation la structure la plus utilisée parce qu'elles fonctionnent à vitesse variable, fonctionne avec convertisseur rotorique est de plus faible puissance et le transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.

6.1.2. À CAGE D'ÉCUREUIL.

Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements rotoriques ne sont alors pas accessibles.

On peut reconnaître une éolienne utilisant une génératrice asynchrone par la forme allongée de la nacelle, qui abrite la chaîne cinétique.

6.1.3. À DOUBLE ALIMENTATION (MADA):

C'est une machine asynchrone a rotor bobiné constitué d'un Stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou à une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques,

La MADA est la plus utilisée dans le domaine éolien parce que les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante, c'est une

machine asynchrone a rotor bobiné peut être alimentée par deux sources distinctes branchées respectivement au stator et au rotor.[12]

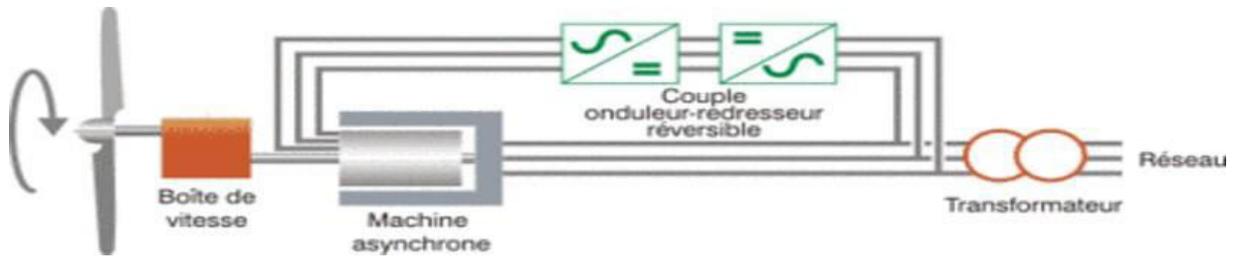


Figure 2.11: Chaîne éolienne utilisant la machine asynchrone

6.2. GENERATRICES A COURANT CONTINU UTILISEES POUR LES EOLIENNES

Aussi appelée dynamo, se compose de 2 parties, L'inducteur est un circuit magnétique (bobine magnétisante) dont le but est de créer un champ magnétique dans l'entrefer et l'enroulement d'induit dans lequel on récupère l'énergie électrique produite par la rotation du rotor. Afin de récupérer l'énergie produite, l'induit comporte un collecteur.

Le courant de sortie est proportionnel à la fréquence de rotation et est directement utilisable pour charger une batterie mais nécessite une conversion continue à l'alternatif pour une injection du courant dans le réseau électrique.

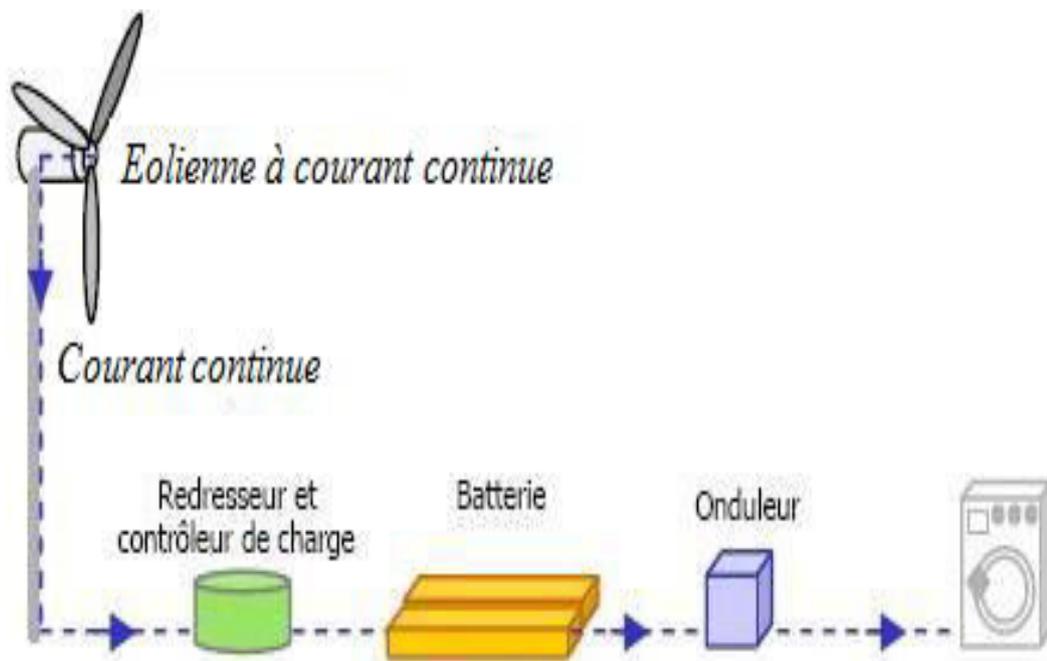


Figure 2.12: Chaîne éolienne utilisant une génératrice à courant continu

L'entretien permettant un bon fonctionnement des éolienne avec un rendement maximum associé à une génératrice à courant continu est plus fréquent car il faut changer régulièrement les balais assurant la liaison avec le collecteur rotatif. Le passage par l'étage continu permet une grande liberté lors de la gestion de l'énergie produite par l'éolienne car on n'a pas de fréquence imposée. C'est un moyen très approprié pour une alimentation de laboratoire ou une habitation isolée qui possède des appareils fonctionnant directement en basse tension continue, de plus il est facile de stoker de l'énergie dans des batteries pour obtenir une source permanente [13] [14]. Cependant il s'agit de se connecter au réseau alternatif, il faut y associer un onduleur ainsi que des filtres et des transformateurs qui permettront de convertir la tension continue en signal alternatif.

6.3. GENERATRICES SYNCHRONES UTILISEES POUR LES EOLIENNES

L'utilisation des génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées à cause du prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares) [13],

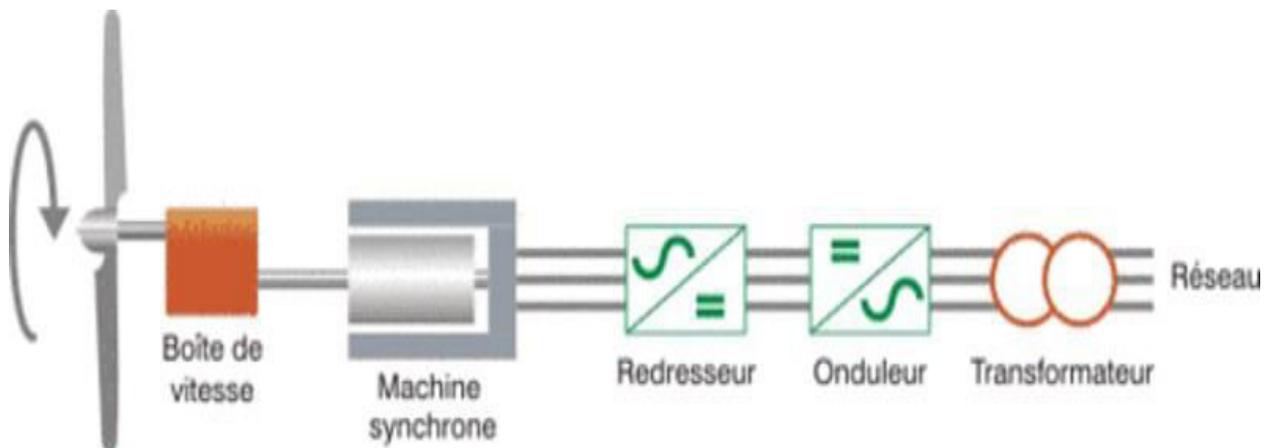


Figure 2.13: Chaîne éolienne utilisant une génératrice synchrone

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et

la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure. Le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. Cette technologie est privilégiée dans le cas des éoliennes offshore car la maintenance est réduite par rapport à une technologie utilisant une boîte de vitesse.

6.3.1. GÉNÉRATRICES SYNCHRONES À ROTOR BOBINÉ

Ce genre de Machine est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. Ces bobines sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Il y a deux types de machines synchrones à rotor bobiné : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants.

La machine à pôles lisses à une inductance constante quelle que soit la position du rotor. En revanche, **la machine à pôles saillants** à un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance. L'alternateur d'automobile à griffes est considéré comme une machine à pôle saillant. [15]

6.3.2. GÉNÉRATRICE SYNCHRONNE À AIMANTS PERMANENTS (GSAP)

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est de plus en plus utilisé dans le domaine des vitesses variables, son choix dans les entraînements à vitesse variable devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones et à courant continu grâce à l'évolution de la technologie des aimants permanents, l'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou de terres rares (par exemple du type alnico, samarium cobalt, néodyme fer bore) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantage : induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines.

Dans la (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants, le champ d'excitation créé par les aimants permanents présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, la MSAP est largement utilisée dans plusieurs applications comme les machines-outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique.

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents :

- Les aimants « rigides » ou durs qui sont bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires ;
- Les aimants « peu rigides » dont les caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes,

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants,

- Les alnicos qui sont des alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt, leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen ;
- Les ferrites qui sont des composés d'oxyde ferriques et d'oxyde de strontium ou de baryum, leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante, leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.
- Les composés de cobalt et de terres rares comme le samarium ont d'excellentes performances techniques, leur champ rémanent et leur excitation coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important.

L'utilisation des aimants comme inducteur dans les machines synchrones offre, par rapport aux autres types de machines, beaucoup d'avantages, entre autres :

- Un facteur de puissance et un rendement élevé.
- Une plus grande robustesse par rapport au moteur à courant continu.
- Une puissance massique élevée.
- Une amélioration de la fiabilité due à l'absence de contacts balais-bagues dans ces machines réduit les problèmes de maintenance.
- Une absence de pertes résistives au rotor.

- Une possibilité d'obtenir une excitation sans pertes joules.

Cependant, ils possèdent quelques inconvénients dont les plus importants sont :

- Une électronique de commande assez compliquée (nécessité d'un capteur de position)
- Un cout élevé à cause du prix des aimants.
- Un problème de tenu à la température des aimants.
- Une fabrication plus compliquée que les machines asynchrones à cage d'écureuil et à réluctance variable.
- Une structure d'alimentation et de régulation complexe
- Des ondulations de couple dues aux harmoniques en régime des basses vitesses.

Les caractéristiques principales des machines à aimants permanents dépendent directement de la qualité de l'aimant permanent utilisé, la puissance électrique est directement proportionnelle à la densité d'énergie dans l'entrefer.

Les systèmes utilisant la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) ont un taux de défaillance faible grâce à la suppression du multiplicateur de vitesse et du système balais-bagues pour les génératrices à aimants, la (GSAP) est caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la génératrice des performances élevées, un rendement important et une meilleure contrôlabilité sur les applications éoliennes.[16]

7. LES CONVERTISSEURS D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ASSOCIES

Les éoliennes à vitesse variable requièrent des systèmes électroniques pour ajuster la tension et la fréquence au réseau électrique. Les éléments basiques de la conversion d'énergie sont la diode (vannes incontrôlables), et les switches (interrupteurs) électroniques (vannes contrôlables) : transistors et thyristors. Le thyristor classique n'est commandé qu'à l'allumage, il s'éteint quand le courant qui le traverse s'annule (inversion de la direction du courant) [17]. Alors qu'avec les transistors et les thyristors commandés à l'allumage et à l'extinction, on peut choisir librement le moment d'interruption du courant. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est

possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles [18].

Cette partie sera plus spécifiquement traitée dans la suite du manuscrit.

8. SYNTHÈSE DE DIFFÉRENTS TYPES DE GÉNÉRATEURS ÉOLIENS

Le tableau 2.1 présente des différentes caractéristiques pour des différentes éoliennes qu'on a étudiés dans les paragraphes précédents.

Le tableau 2.1 les différentes caractéristiques des différentes éoliennes :

Type de l'éolienne	Interface Réseau	Moyen de Contrôle	Fonctionnement principale	Services systèmes
MAS Vitesse Fixe	(Facultatif) Gradateur Bancs de condensateurs	Pitch control	- Contrôle P approximatif - Contrôle Q approximatif si condensateur	NON
MADA Vitesse Variable	Convertisseur électronique AC/AC au rotor (AC/DC puis DC/AC)	Pitch control Couple génératrice	Contrôle de P Contrôle de Q	-Participation limitée au : Réglage de la fréquence - Réglage de la tension Tant qu'il y a du vent
MSAP Vitesse Variable	Convertisseur électronique AC/AC au stator (AC/DC puis DC/AC)	- Pitch control (ou stall) - Couple génératrice	- Contrôle de P - Contrôle de Q Fonctionnement en site isolé	- Réglage de la fréquence - Réglage de la tension - Ilotage tant qu'il y a du vent

Tableau 2.1 : Capacités de réglage des différentes éoliennes. [23], [24]

9. L'ÉOLIENNE ANELION SW 3.5-GT

9.1. PRESENTATION DE L'ÉOLIENNE ANELION SW 3.5-GT

L'éolienne qui existe dans notre laboratoire (**Laboratoire Matériaux Optiques, Photoniques Et Systèmes (LMOPS), Thionville**) est une petite éolienne, l'éolienne **ANELION SW 3.5-GT** d'une puissance de 5000W crête connectée avec une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), cette éolienne est caractérisée par une haute efficacité et faibles niveaux de bruit grâce à son système avancé de contrôle électronique, associé à un profil aérodynamique à haute efficacité, la turbine SW3.5-GT est l'une des plus efficaces du marché de petit éolien et également l'une des plus silencieuses, sa conception mécanique basée sur un respect strict des normes de conception les plus exigeantes, L'assemblage totalement hermétique de la nacelle, ainsi que l'application de traitements et de peintures de haute qualité sur toutes les pièces métalliques, garantissent une protection maximale de tous les composants de l'éolienne, contre le vieillissement provoqué par la poussière et les agents atmosphériques, y compris dans les milieux les plus agressifs.



Figure 2.14: Eolienne Anelion (laboratoire LMOPS Thionville)

Le tableau 2.2 présente les différentes caractéristiques techniques de l'éolienne Anelion : telles que définies dans son document technique

Puissance Maximale (W)	5000
Puissance à vent 12 m/s (W)	3500
Poids (Kg)	125
Diamètre du rotor (m)	3.5
Surface de balayage (m²)	9.62
Configuration du rotor	3 Pales sous le vent
Pales	Epoxi renforcé à la fibre de verre
Plage de vitesse (rpm)	100-465
Type de générateur	Direct Drive PMSG
Contrôle d'orientation	Passif
Contrôle de puissance	Suivi de courbe de puissance maximale
Onduleur de connexion au réseau	SMA/ Ingeteam/ Delta (5KW)
Type d'onduleur	Monophasé pour injection sur le réseau
Système de freinage	Système de freinage électronique actif et système redondant de sécurité passive électrique/mécanique
Vitesse du vent de démarrage (m/s)	3.5
Vitesse du vent de coupure (m/s)	17

Tableau 2.2 : Caractéristiques techniques de l'Anelion. [25]

Son Système de contrôle intelligent et les excellentes prestations de sa génératrice (GSAP) permettent d'exercer un contrôle total sur tous les paramètres de fonctionnement, y compris dans les conditions du vent les plus sévères, le système redondant de freinage électromécanique garantit une sécurité maximale dans toutes les situations, le système de contrôle électronique permet aussi de maîtriser strictement tous les paramètres de fonctionnement de la turbine, sans besoin de systèmes mécaniques de contrôle, Ceci permet de réduire drastiquement les sources de pannes et les exigences d'entretien.[25]

Les figures ci-dessus montrent les différents éléments de l'éolienne Anelion de notre laboratoire, (Figure 2.15 a) présente la Nacelle de l'éolienne, (Figure 2.15 b) présente la pale de l'éolienne, (Figure 2.15 c) présente l'onduleur de connexion au réseau **SMA**, (Figure 2.15 d) présente la boîte de contrôle de l'éolienne Anelion.

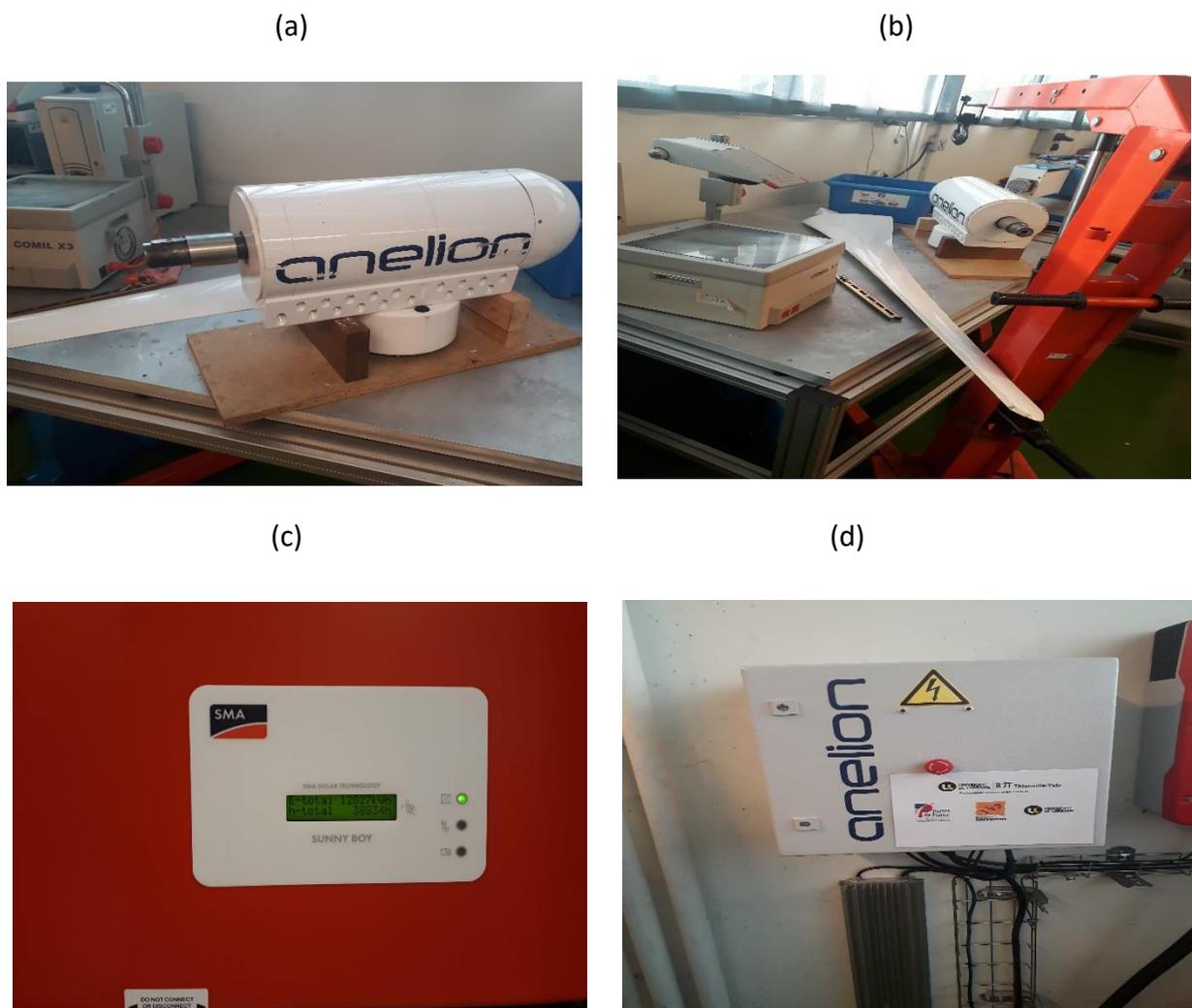


Figure 2.15: les différents éléments de l'Anelion

9.2. LA CARACTERISTIQUE $V_{\text{ROTATION}}-V_{\text{VENT}}$ DE L'ÉOLIENNE ANELION

La figure ci-dessous présente les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne Anelion suivant les caractéristiques techniques données ci-dessus ;

Cette stratégie de commande présente le comportement de notre éolienne en fonction de la vitesse du vent ainsi que la variation de la vitesse de rotation en rad/s.

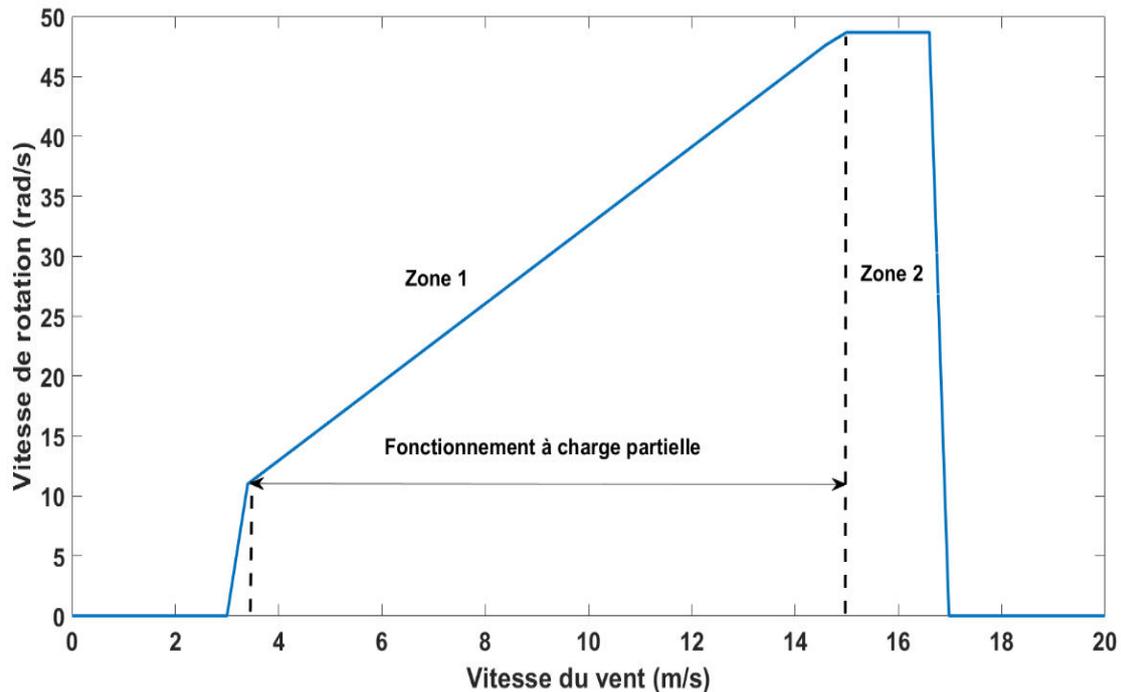


Figure 2.16: Vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent

Le fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne nécessite la définition d'une stratégie globale de contrôle du générateur, tenant compte des variations de vitesse de rotation, de couple ou de puissance souhaitée en fonction des variations du vent, La Figure 2.16 représente la variation de la vitesse de rotation de l'Anelion en fonction de la variation de la vitesse du vent. C'est une forme naturelle d'indiquer la stratégie de commande par différentes zones:

- Zone 1 : l'Anelion fonctionne en charge partielle. Ici l'objectif est d'optimiser le rendement énergétique. Ainsi, la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir dans le point de fonctionnement de rendement aérodynamique

maximal. Cette considération évite de prendre en compte le fonctionnement du traqueur de point de puissance maximale dans la simulation car cette optimisation est considérée selon les données du fabricant dans la fiche technique. Dans cette zone, le couple électromagnétique est le seul degré de liberté considérée pour le contrôle. L'angle de calage est maintenu constant à la valeur correspondante à une capture de puissance maximale.

- Zone 2 : Cette zone correspond à des vitesses du vent supérieures à 15m/s jusqu'à la vitesse de coupure 17m/s, c'est la partie du fonctionnement à plein charge, Ici le couple électromagnétique est maintenu à sa valeur nominale et la puissance mécanique est limitée par un système de freinage électronique associé à un rendement de sécurité électrique/mécanique passif permettant la régulation à vitesse nominale et donc à la valeur nominale de Puissance. Au-delà de la vitesse de coupure, ce système de freinage bloque le fonctionnement de l'éolienne

9.3. LES CARACTERISTIQUES PUISSANCE/ENERGIE – V_{VENT} DE L'ÉOLIENNE ANELION

Les autres caractéristiques fournies dans la notice technique concernent les caractéristiques puissance électrique (W) et Energie (kW/an) en fonction de la vitesse du vent (m/s). Une représentation de ses caractéristiques est proposée dans la figure 2.17, ci-dessous.

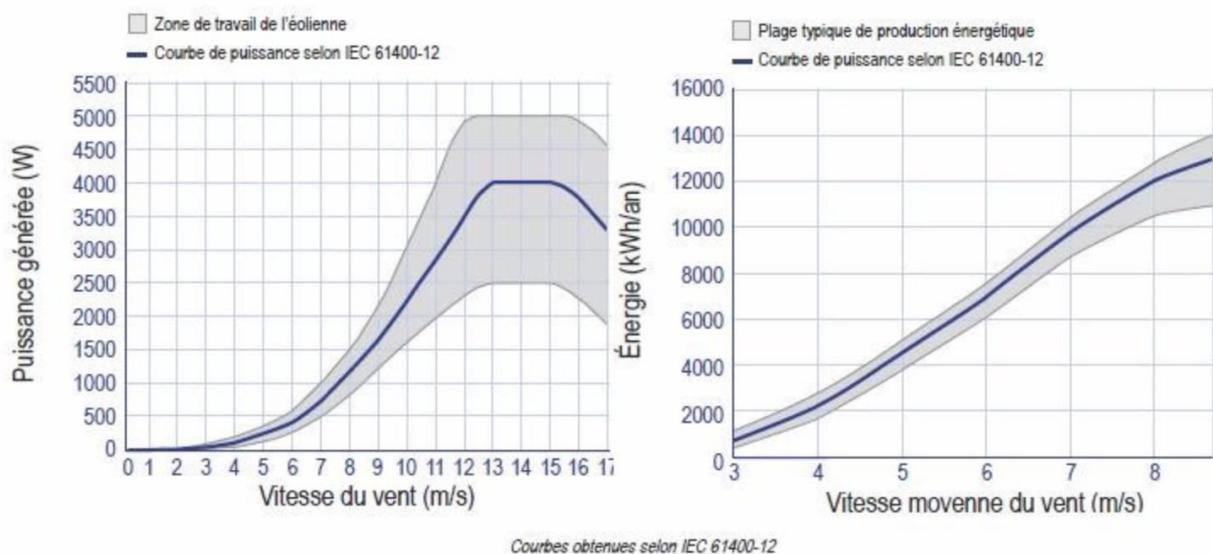


Figure 2.17: Caractéristiques Puissance/Energie – V_{vent} de l'éolienne Anelion

Nous pouvons clairement voir dans ces caractéristiques l'influence des différentes zones de fonctionnement comme représentée dans la Figure 2.16 avec la puissance électrique que peut délivrer l'éolienne Anelion égale à 3500W pour une vitesse de rotation nominale de 12m/s. Il apparaît au delà une saturation dans la génération de puissance avec un débrayage ensuite au delà de 15m/s ayant pour rôle de protéger l'éolienne en présence de vents forts. La caractéristique Puissance- V_{vent} montre ainsi que l'éolienne Anélion intègre directement un système de régulation permettant un fonctionnement au point de puissance maximum et une protection des vents forts. Ceci sera pris en compte dans la modélisation présentée dans les chapitres suivants permettant, de façon originale d'envisager un modèle simple basé sur la fiche technique, en général accessible d'une éolienne, quelque soit sa constitution interne.

10. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié l'énergie éolienne en détaillant ses propriétés. Pour cela, nous avons commencé par la source initiale qui permette de produire de l'électricité grâce un aérogénérateur, on a aussi défini les différents appareils de mesure de cette source, puis nous avons détaillé aussi les différents systèmes éoliens et la constitution mécanique et électrique de chaque système de conversion.

Nous avons présenté dans La dernière partie de ce chapitre, le modèle de l'éolienne existant dans notre laboratoire, une Eolienne ANELION SW 3.5-GT 3500 W à 12 M/S à 5000 W/crête. A partir de des données du constructeur reportées dans sa fiche technique, nous avons analysé son mode de fonctionnement. Les modélisations de la partie éolienne réalisées dans ce travail de doctorat, ont été développées pour une éolienne de moyenne puissance et ainsi validées pour l'éolienne Anelion présentée dans ce chapitre.

Le chapitre suivant est consacré à la modélisation de la chaîne éolienne : depuis la turbine avec en entrée la vitesse du vent, en passant par la génératrice de type GSAP (PMSG) et, en sortie, en considérant l'électronique de puissance permettant d'élever la tension DC.

11. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE II

- [1] Histoire de France pour tous (le moulin à vent 700 avant J.C)
- [2] Desire Le Gourieres, Livre : Les éoliennes, Théorie, conception et calcul pratique, 2008.
- [3] B. Bogno, « Contribution au développement des systèmes, technologies et matériaux pour une exploitation optimale des énergies renouvelables en Afrique subsaharienne, 2017.
- [4] Eolien participatif en Wallonie, site officielle entreprise mondial.
- [5] Wiki Eolien/ installation/ fondation, site web.
- [6] Eoliennes en mer, Dieppe et Le Tréport, fiche thématique, les différents types de fondations existants, 2016.
- [7] I. Laaroussi, "Transmission à variation continue pour éolienne," Master gestions des réseaux d'énergie électrique, Université de Lille, 2012.
- [8] Z. Boudjema, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) » ; Thèse de Doctorat en Electro-technique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Février 2015.
- [9] N. ZIDANE, « Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Énergies Renouvelables » Mémoire Master, Université Ferhat Abbas -SETIF1, Faculté de Technologie, 2014
- [10] P. Rajesh Kumar Reddy, K. Maheshwara Rao, P.Bala Kishore, "WIND TURBINE PITCH AND YAW CONTROL", International Journal of Science, Technology & Management, 2015.
- [11] Site web, Entreprise Bonfiglioli Forever Forward, <http://www.bonfiglioli.fr/>
- [12] S. Mekhtoub, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique 2007.
- [13] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », thèse de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, septembre 2011.
- [14] N. Cherfia, « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens », Mémoire de Magister, Université Mentouri – Constantine, juin 2010.

- [15] L. E. Radaorozandry, « conception et optimisation des Machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique », UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2007.
- [16] R. Abdessemed, Livre : Modélisation et simulation des machines électriques 2011.
- [17] N. Zioui, "Conception, modélisation et commande d'une éolienne à axe vertical," Thèse de Magister, Ecole national polytechnique, 2008.
- [18] M. Daachi Mustapha, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Master 2013.
- [19] <http://www.wwindea.org/WWEA>.
- [20] <http://www.ademe.fr>.
- [21] <http://www.awea.org/>.
- [22] N.M. Kasbadji, « Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » ; Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [23] V. Courtecuisse, « supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique » ; Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, Novembre 2008.
- [24] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ; Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007.
- [25] Fiche technique Anelion, Mini-éolienne SW 3.5-GT, Anelion smart power.

CHAPITRE III

Etude et modélisation d'une éolienne en fonctionnement autonome

Chapitre III

Etude et modélisation d'une éolienne en fonctionnement autonome

SOMMAIRE DU CHAPITRE III

SOMMAIRE DU CHAPITRE III.....	97
TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE III	99
1. INTRODUCTION.....	101
2. MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	102
3. STRATEGIE DE CONTROLE.....	108
4. LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS (MSAP).....	110
5. LA GENERATRICE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS (GSAP).....	114
6. L'ETAGE DE CONVERSION ELECTRIQUE EN SORTIE D'UNE GSAP.....	118
7. L'ETAGE DE CONVERSION DC/HVDC RETENU DANS L'ETUDE.....	129
8. CONCLUSION	131
9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE III	133

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE III

Figure 3.1: Système de Conversion Eolienne à base de la PMSG	101
Figure 3.2: Courbe $C_p(\lambda, \beta)$	103
Figure 3.3: Schéma block de la modélisation de l'Anelion	104
Figure 3.4: Coefficient de puissance de l'Anelion (fiche technique du constructeur).....	105
Figure 3.5: Coefficient de puissance de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent.....	106
Figure 3.6: Puissance générée de l'Anelion (fiche technique Anelion).....	106
Figure 3.7: Puissance générée de l'Anelion	107
Figure 3.8: Couple mécanique de l'Anelion	107
Figure 3.9: Stratégie de commande classique	109
Figure 3.10: Vitesse de rotation de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent	109
Figure 3.11: Représentation de la GSAP dans le plan (abc), et le plan(dq)	111
Figure 3.12: Circuit équivalent de la MSAP	113
Figure 3.13: Schéma block de l'ensemble (Anelion, PMSG, convertisseur AC/DC).....	115
Figure 3.14: Tensions statoriques de la PMSG	117
Figure 3.15: Courants statoriques de la PMSG	117
Figure 3.16: Conversion d'Energie à base des Convertisseurs statiques.....	119
Figure 3.17: Caractéristiques statiques d'une diode	121
Figure 3.18: Caractéristiques de fonctionnement d'un thyristor	122
Figure 3.19: Convertisseur DC/DC boost.....	123
Figure 3.20: Convertisseur DC/DC buck	124
Figure 3.21: Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension (a) monophasé (b) triphasé.....	126
Figure 3.22: Principe de fonctionnement d'un convertisseur AC/AC.....	127
Figure 3.23: Redresseur triphasé PD3	128
Figure 3.24: Tension redressée du convertisseur AC/DC.....	130
Figure 3.25: Courant redressé du convertisseur AC/DC	130

1. INTRODUCTION

Après avoir abordé dans les chapitres précédents, les différentes sources d'énergies renouvelables et leurs principe de fonctionnement, et précisément l'énergie éolienne et leurs différentes parties de fonctionnement (partie électrique et partie mécanique) dans le deuxième chapitre, on va étudier dans ce chapitre la modélisation sous Matlab-Simulink de l'ensemble de notre éolienne (ANELION SW 3.5-GT) ainsi que la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG), ainsi que la première partie de conversion en électronique de puissance.

Le système de conversion éolien à vitesse variable qu'on va étudier dans ce chapitre et dans le prochain chapitre est illustré sur la figure 3.1, la turbine éolienne (Anelion) entraîne la (PMSG) à une vitesse de rotation variable qui varie entre 10.47 rad/s et 48.69 rad/s, notre système peut fonctionner en deux modes.

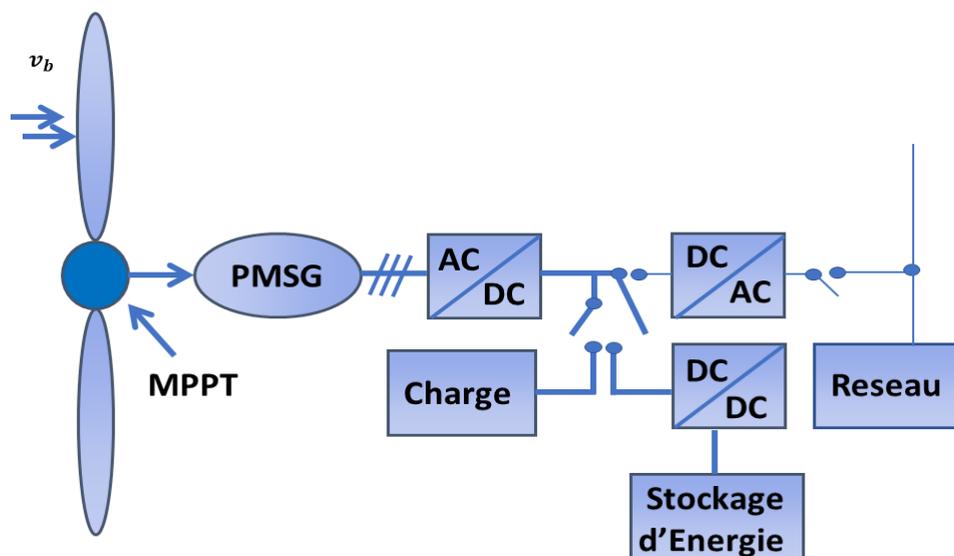


Figure 3.1: Système de Conversion Eolienne à base de la PMSG

Le premier mode c'est le travail de notre thèse, c'est la connexion de l'Anelion avec la PMSG qui alimente une charge résistive, après c'est la partie de l'électronique de puissance la conversion se fait via un convertisseur AC/DC à diodes, et un Boost DC/DC pour alimenter le Bus HVDC, la dernière partie c'est la partie du stockage de l'énergie qui se fait par des

différentes technologies de stockage comme : batteries, pile à combustible, super-condensateurs, électrolyseur.

Le deuxième mode est identique au premier sauf que dans ce mode de fonctionnement on néglige la partie du stockage, et on étudiera la connexion de la chaîne éolienne au réseau via un onduleur DC/AC.

2. MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

Trois facteurs déterminent l'énergie du vent balayée par le rotor : La densité d'air ρ , la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent v_b , la puissance disponible dans le vent est proportionnelle à la vitesse cubique du vent, conformément à la formule suivante [1] :

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_b^3 \quad (3.1)$$

p_{wind} : la puissance disponible dans le vent ;

ρ : la densité de l'air en (Kg/m^3) ;

v_b : la vitesse du vent en aval en m/s ;

R : Rayon de l'aérogénérateur en m ;

La puissance mécanique extraite par l'éolienne est exprimé comme suit [2][3] :

$$P_{extract} = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho \left(\frac{v_a + v_b}{2} \right) (v_b^2 - v_a^2) \quad (3.2)$$

$p_{extract}$: puissance extraite du vent ;

v_a : la vitesse du vent en amont en m/s ;

Le coefficient de puissance est défini par la limite de Betz, La limite de Betz est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à $16/27 \approx 59.3\%$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne [4].

Le coefficient de puissance C_p dépend du nombre de pâles du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profil des sections). Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) [5] [6].

Ce coefficient est exprimé par le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance disponible de vent circulant dans les pales de la turbine à une vitesse du vent spécifique c'est-à-dire :

$$C_p = \frac{P_{extract}}{P_{wind}} \quad (3.3)$$

Pour des éoliennes caractérisées par des différents angles de calage des pales, la figure ci-dessous affiche les différentes courbes du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β dans le cas idéal ou on suppose qu'il n'y a pas de pertes.

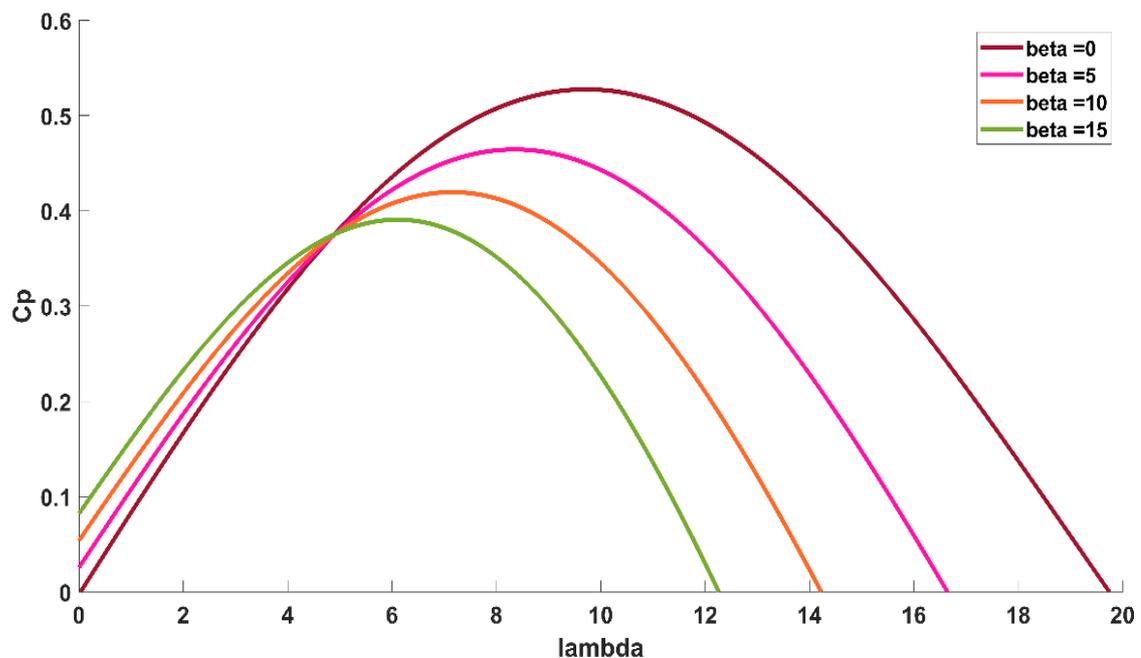


Figure 3.2: Courbe $C_p(\lambda, \beta)$

D'après la figure 3.2, la turbine produit le maximum de puissance mécanique à un coefficient de puissance C_p maximum. Il est bien clair que la valeur du C_p est maximale pour la courbe où l'angle β est égale à 0° . Ce point de puissance correspond à $\lambda = 9.6$. On remarque donc que plus l'angle de calage β augmente il entraîne une diminution du coefficient de puissance C_p et par voie de conséquence une puissance mécanique produite en diminution aussi.

La limite théorique appelée limite de Betz fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse du vent donnée, cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de rotation mécanique de l'éolienne et la vitesse du vent [4].

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{v_b} \quad (3.4)$$

ω_m : Vitesse de rotation mécanique en rad/s ;

Les petites éoliennes sont des systèmes simples ayant généralement un pas fixe. C'est le cas de notre éolienne. Cette éolienne (Anelion SW 3.5 GT) possède une puissance nominale égale à 3,5 kW. A une vitesse du vent de 3.5 m/s, l'éolienne commence son travail jusqu'à une vitesse du vent arrêtée de 17 m/s. Le diamètre du rotor de l'éolienne est de 3,5 m correspondant à une surface active du rotor de 9,62 m². L'éolienne est équipée de 3 pales de rotor. La vitesse maximale du rotor est de 465 tpm. Sa puissance maximale délivrée est de 5 kW et la valeur maximale de C_p est égale à 0,37.

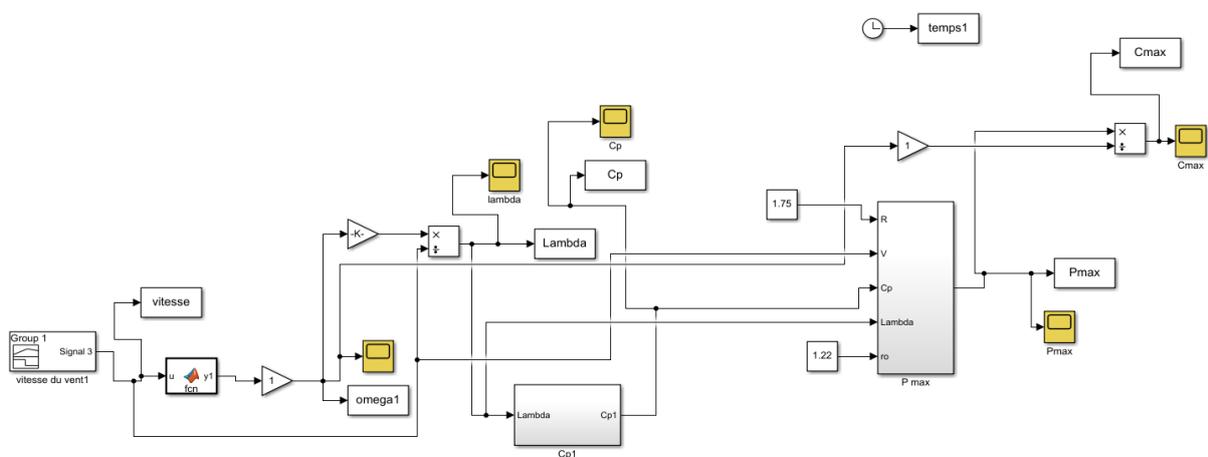


Figure 3.3: Schéma block de la modélisation de l'Anelion

Dans le cadre de cette thèse La relation entre C_p et la vitesse du vent est donnée à partir de la fiche technique de l'éolienne fournie par le fabricant. Cette relation est représentée sur la figure 3.4. Cette figure présente le coefficient de puissance de l'Anelion déduite à partir des données fournies dans sa fiche technique.

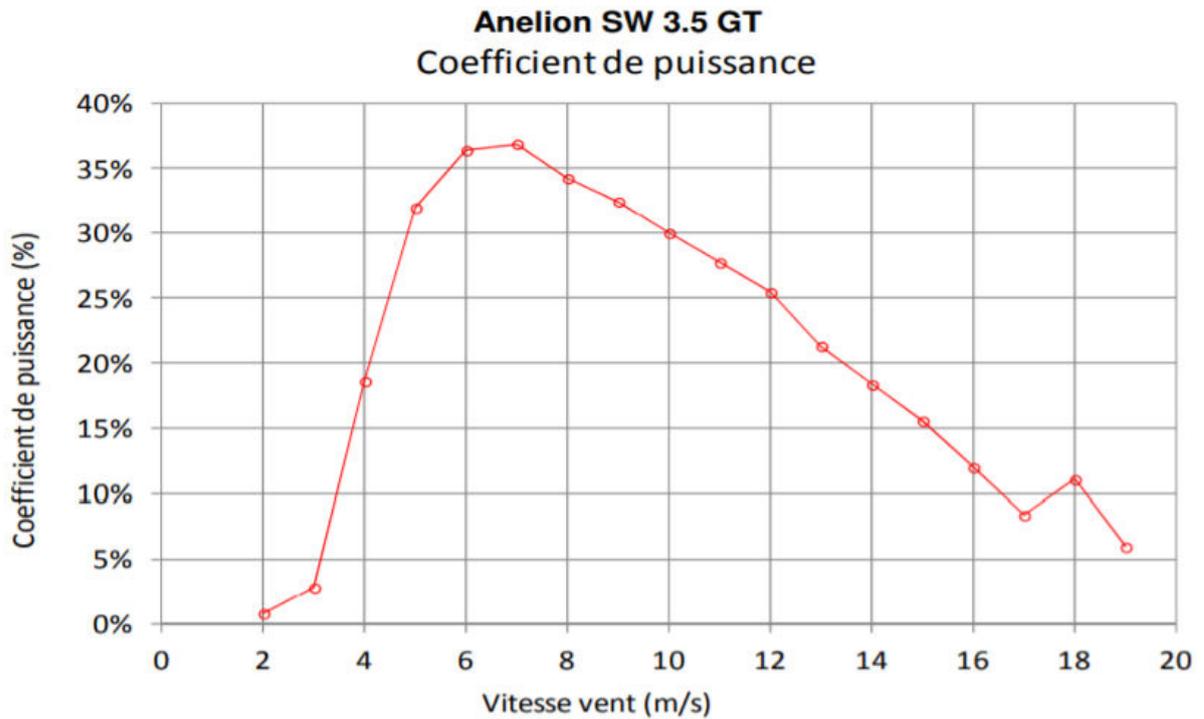


Figure 3.4: Coefficient de puissance de l'Anelion (fiche technique du constructeur)

A partir de la modélisation de l'Anelion présentée dans la figure 3.3, le coefficient de puissance de l'Anelion sous Matlab-Simulink est présentée dans la figure 3.5 .

La puissance mécanique produite par l'éolienne est de [7] [8] :

$$P_{méc} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 v_b^3 \quad (3.5)$$

Le couple mécanique exercé par le vent sur la turbine éolienne est défini par :

$$C_{max} = \frac{P_{méc}}{\omega_m} \quad (3.6)$$

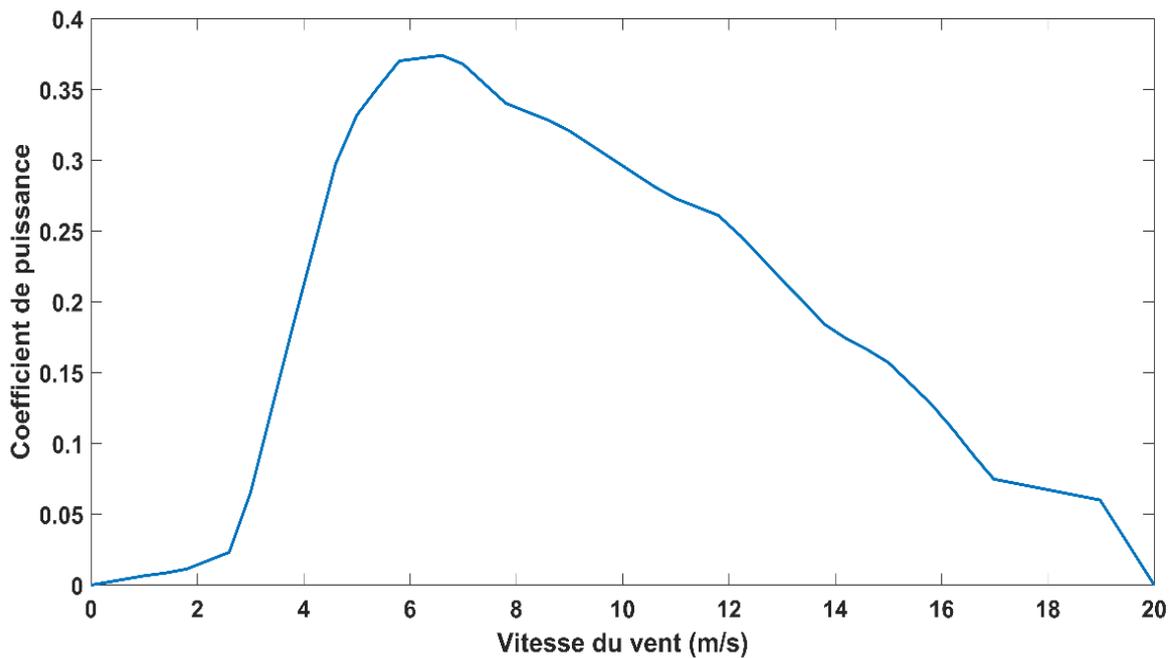


Figure 3.5: Coefficient de puissance de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent

La figure 3.6 présente la caractéristique puissance générée de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent donnée par le constructeur ;

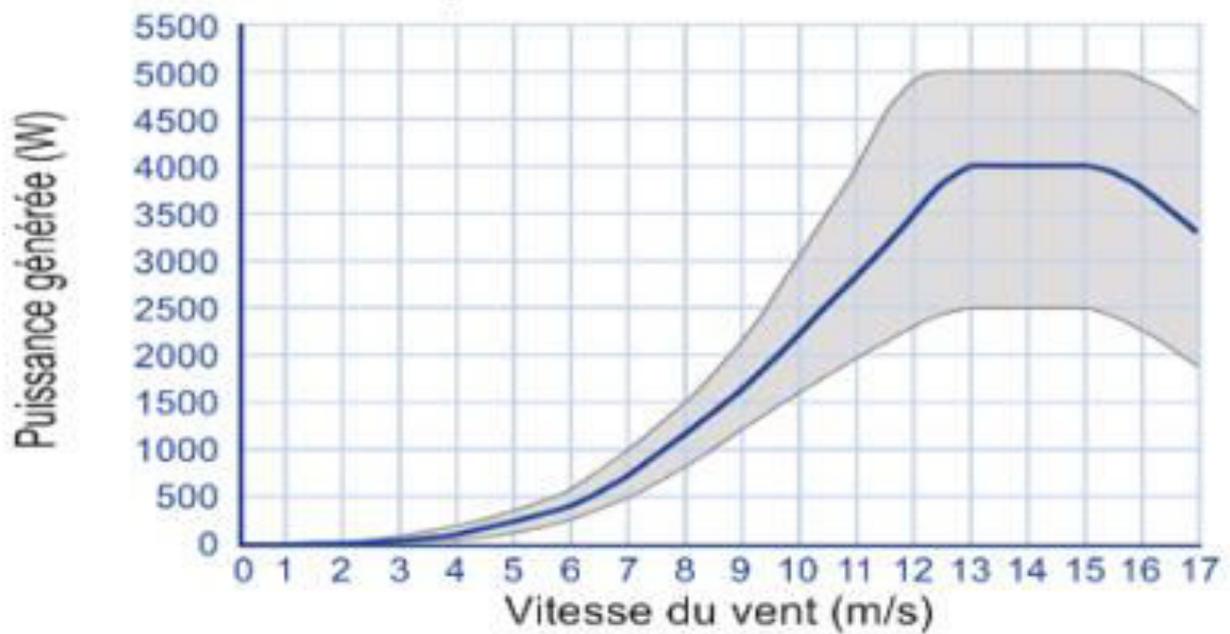


Figure 3.6: Puissance générée de l'Anelion (fiche technique Anelion)

Les figures 3.7 et 3.8 présentent la variation de la puissance mécanique et la variation du couple mécanique respectivement en fonction de la vitesse du vent pour l'Anelion ;

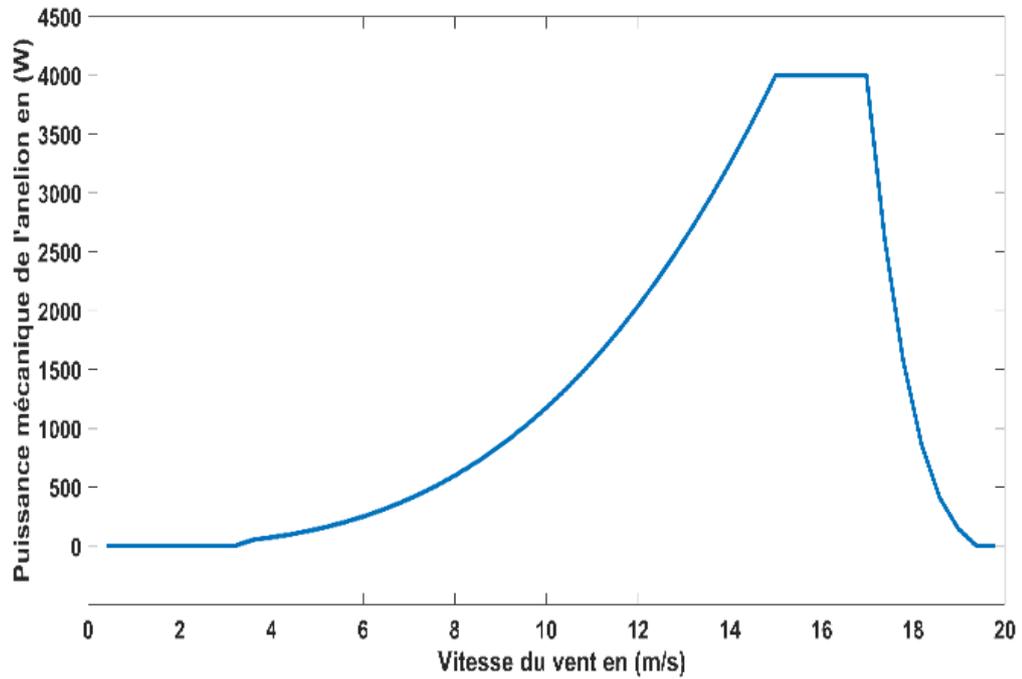


Figure 3.7: Puissance générée de l'Anelion

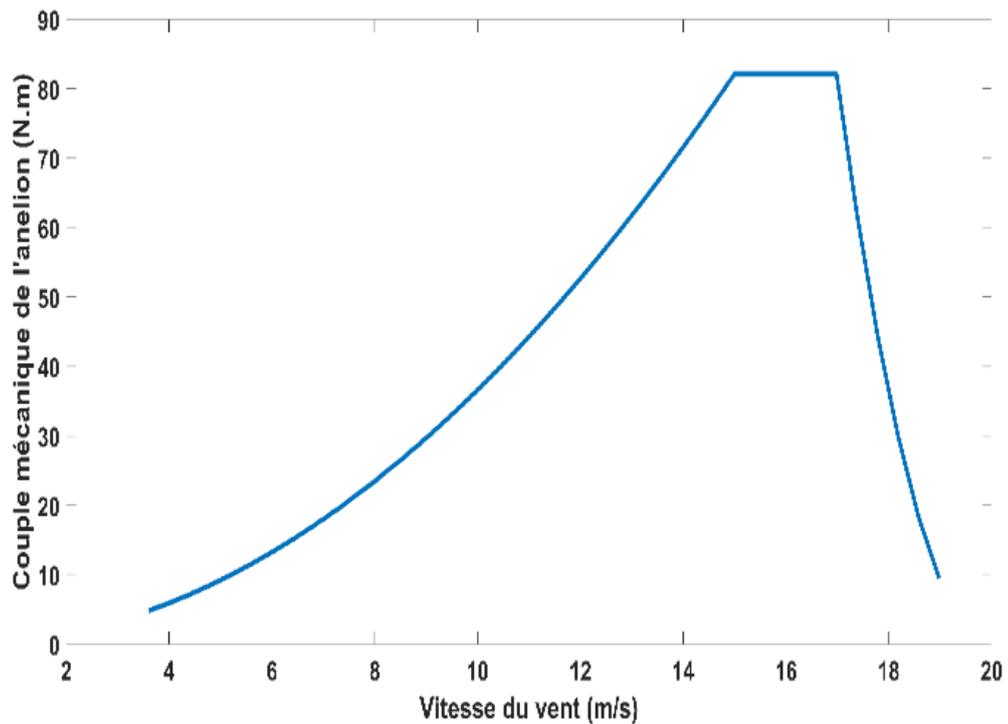


Figure 3.8: Couple mécanique de l'Anelion

Grace à la modélisation présentée dans la figure 3.3 on retrouve bien la forme de la caractéristique Puissance générée en fonction de la vitesse du vent fournie par le constructeur.

Notre modélisation nous permet de voir le point de puissance maximum comme indiqué sur la figure 3.6 pour une puissance de 4000W, En utilisant l'équation 6 on retrouve la caractéristique couple mécanique en fonction de la vitesse du vent figure 3.8.

3. STRATEGIE DE CONTROLE

La Figure 3.9 illustre la stratégie de commande classique développée pour les systèmes de génération éoliens à vitesse variable et régulation de puissance [9]. Cette figure représente la variation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur en fonction de la variation de la vitesse du vent, (elle peut également être représentée sur un plan défini par exemple par la vitesse de rotation et le couple transmis par l'aérogénérateur). Cette stratégie de commande, basée sur une variation linéaire de la vitesse du vent nous permet dans les simulations de parcourir la plage complète de la vitesse de vent pour le fonctionnement de l'Anelion comme défini par le constructeur.

La stratégie présentée dans la figure 3.9 est appliquée à notre stratégie de commande de l'Anelion figure 2.15 du chapitre précédent.

Ainsi, pour l'éolienne Anelion figure 3.10 :

- V_{V-con} Est la vitesse de démarrage de l'Anelion qui correspond à 3.5m/s et à une vitesse de rotation de 10.47 rad/s, dans cette zone du V_{V-con} jusqu'au V_{V-non} la puissance fournie dépend de la variation de la vitesse du vent,
- V_{V-non} Est la vitesse nominale qui Correspond à 15m/s dans cette zone l'Anelion produit le maximum de puissance pour une vitesse de rotation de 48.69 rad/s,
- V_{V-dec} Est la vitesse de déconnexion qui correspond à 17m/s pour l'Anelion, c'est la vitesse de coupure, l'Anelion ne produit rien à partir de cette valeur, un système de freinage électronique est automatiquement intégré à l'Anelion.

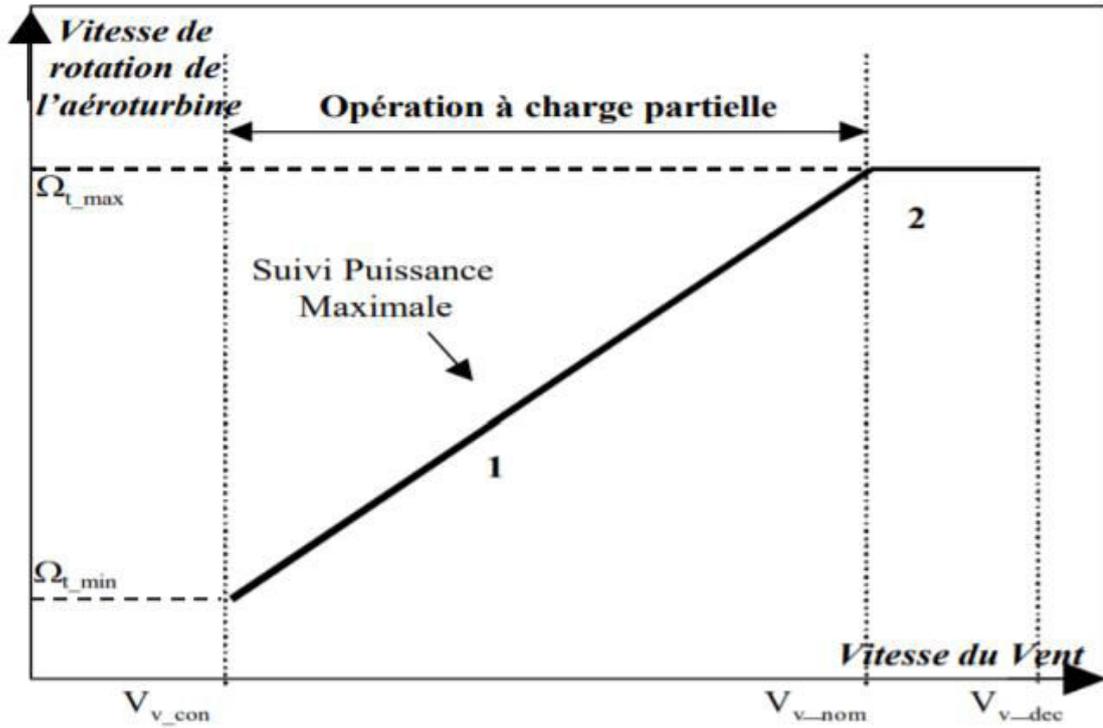


Figure 3.9: Stratégie de commande classique

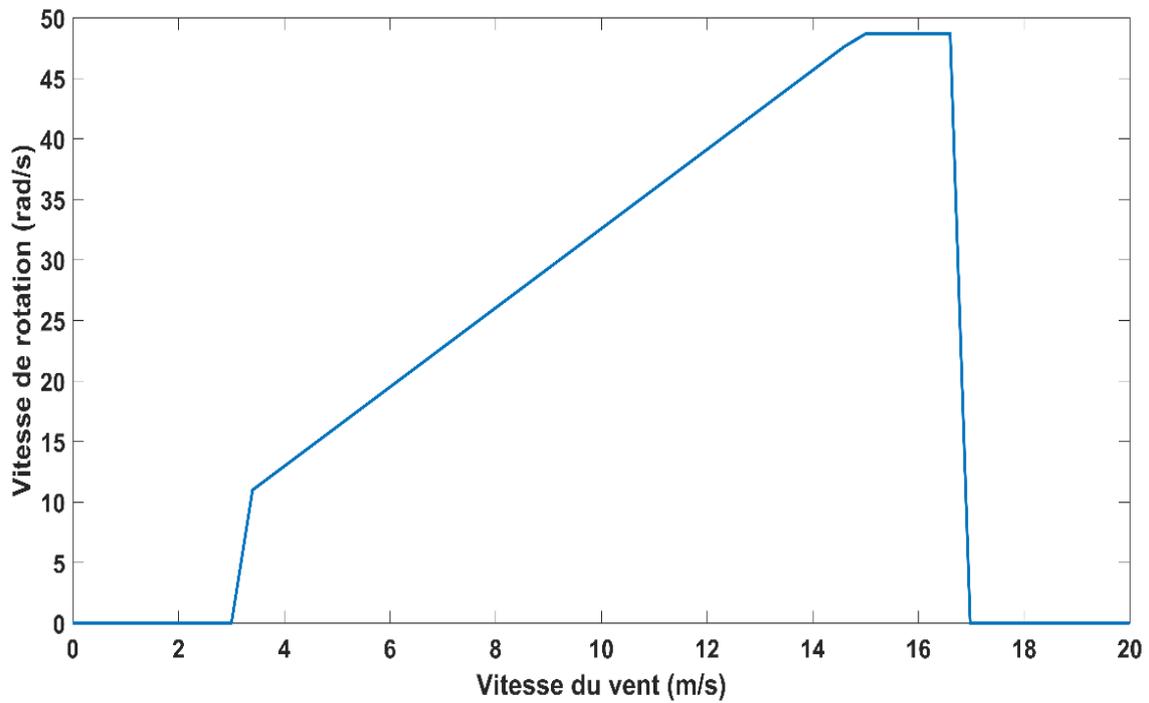


Figure 3.10: Vitesse de rotation de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent

4. LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS (MSAP)

4.1. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Afin de reproduire précisément le comportement d'une machine synchrone à aimants permanents aux régimes transitoires MSAP, nous allons construire son modèle dynamique. Pour obtenir ce modèle, nous allons faire les hypothèses suivantes [10].

- Absence de la saturation dans le circuit magnétique ;
- Les FEM créées par les enroulements du stator ont une allure sinusoïdale ;
- L'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau sont négligés ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- Absence de couplage magnétique entre les trois enroulements.

4.2. EQUATIONS CARACTERISTIQUES D'UNE MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 10 paires de pôles. Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer. Les expressions des flux mutuels inducteur-phase sont données par [11] :

$$\phi_a = \phi_f \cos(P\theta) \quad (3.7)$$

$$\phi_b = \phi_f \cos\left(P\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.8)$$

$$\phi_c = \phi_f \cos\left(P\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.9)$$

ϕ_f est la valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques.

Les équations électriques de la MSAP dans le plan (a, b, c) sont :

$$v_a = [R_s][i_a] + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.10)$$

$$v_b = [R_s][i_b] + \frac{d\phi_b}{dt} \quad (3.11)$$

$$v_c = [R_s][i_c] + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (3.12)$$

$[\phi_a, \phi_b, \phi_c]$ sont les composantes vecteurs des flux statoriques.

$[R_s]$ est la résistance d'une phase d'enroulement statorique.

4.3. REPRESENTATION DE LA MSAP DANS LE PLAN DE PARK

La modélisation de cette machine nécessite aussi comme toute autres machines triphasées de passer du système d'axes triphasés (réel) au système d'axes biphasés (et réciproquement).

La figure 3.11 montre la représentation de la MSAP dans le repère triphasé (abc) ainsi que dans le repère de Park ;

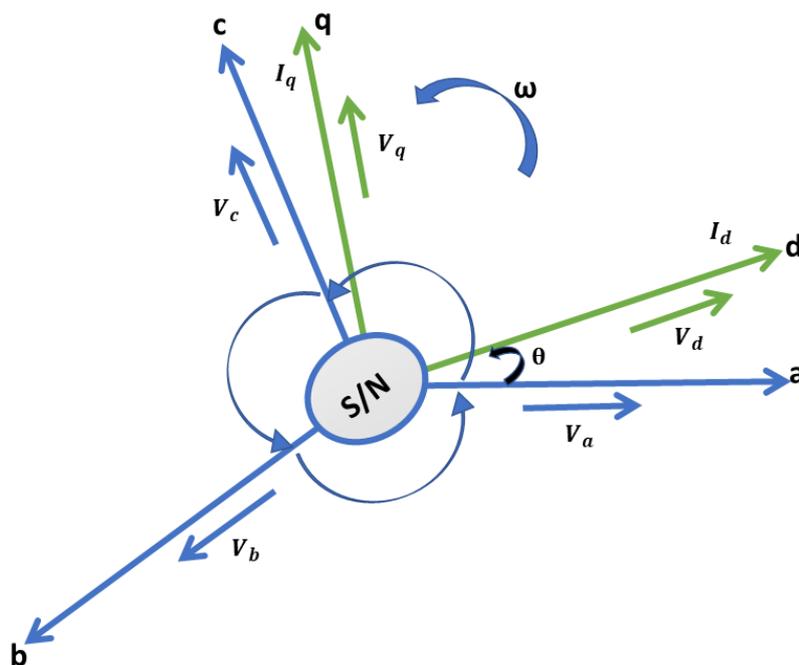


Figure 3.11: Représentation de la GSAP dans le plan (abc), et le plan(dq)

Pour cela il faut utiliser les transformations de Park suivantes :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Pour notre étude on suppose qu'on a un système triphasé équilibré c'est pour cela on néglige le composant homopolaire.

Après Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$[i_{dq}] = P(\theta)[i_{abc}] \quad (3.14)$$

$$[v_{dq}] = P(\theta)[v_{abc}] \quad (3.15)$$

$$[\phi_{dq}] = P(\theta)[\phi_{abc}] \quad (3.16)$$

La vitesse de rotation électrique de la MSAP est définie comme suit :

$$\omega = P\omega_m \quad (3.17)$$

P : nombre de paires de pôles.

Les tension v_d et v_q de la MSAP suivant le référentiel de Park sont : [16]

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega L_q i_q \quad (3.18)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega L_d i_d + \omega \phi_f \quad (3.19)$$

Avec :

L_d : L'inductance statorique à l'axe d.

L_q : L'inductance statorique à l'axe q.

4.4. CIRCUIT EQUIVALENT DE LA MSAP

Les circuits électriques équivalents de la MSAP à partir des équations précédentes peuvent être représentés comme suit :

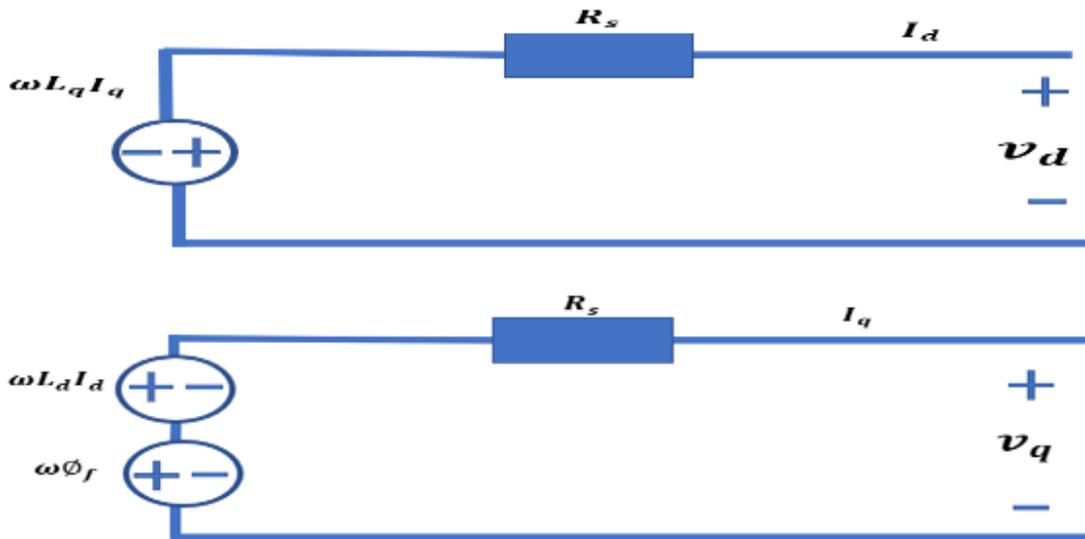


Figure 3.12: Circuit équivalent de la MSAP

4.5. EXPRESSIONS DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE LA MSAP

Pour compléter le modèle électromécanique de la MSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique [12].

L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \phi_f] \quad (3.20)$$

Notre génératrice synchrone est à pole lisse, c'est-à-dire $L_q = L_d$ alors l'expression de couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_q \phi_f \quad (3.21)$$

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} - f_m \omega_m = C_t - C_{em} \quad (3.22)$$

Avec :

J : l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice.

f_m : le coefficient de frottement visqueux.

C_t : le couple turbine fournie par l'éolienne.

5. LA GENERATRICE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS (GSAP)

Nous rappelons que la "GENERATRICE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS (GSAP), est appelée PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG) dans la définition internationale. On retrouvera cette double notation indifféremment dans la suite de ce manuscrit.

Pour la convention génératrice de la machine synchrone à aimants permanents, les sens des courants i_d et i_q dans les repères de Park sont inversés. Ainsi, le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents obtenu s'écrit sous la forme [11] [13] [14] :

$$v_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega L_q i_q \quad (3.23)$$

$$v_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \phi_f \quad (3.24)$$

Nous présentons dans le schéma suivant le modèle Matlab/Simulink que nous avons développé.

Dans cette modélisation, nous avons supposé que la GSAP alimente une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}). Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice [12], on applique d'une part, les tensions v_d et v_q données par:

$$v_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{ch} i_q \quad (3.25)$$

$$v_q = R_{ch}i_q + L_{ch} \frac{d}{dt}i_q + \omega L_{ch}i_d \tag{3.26}$$

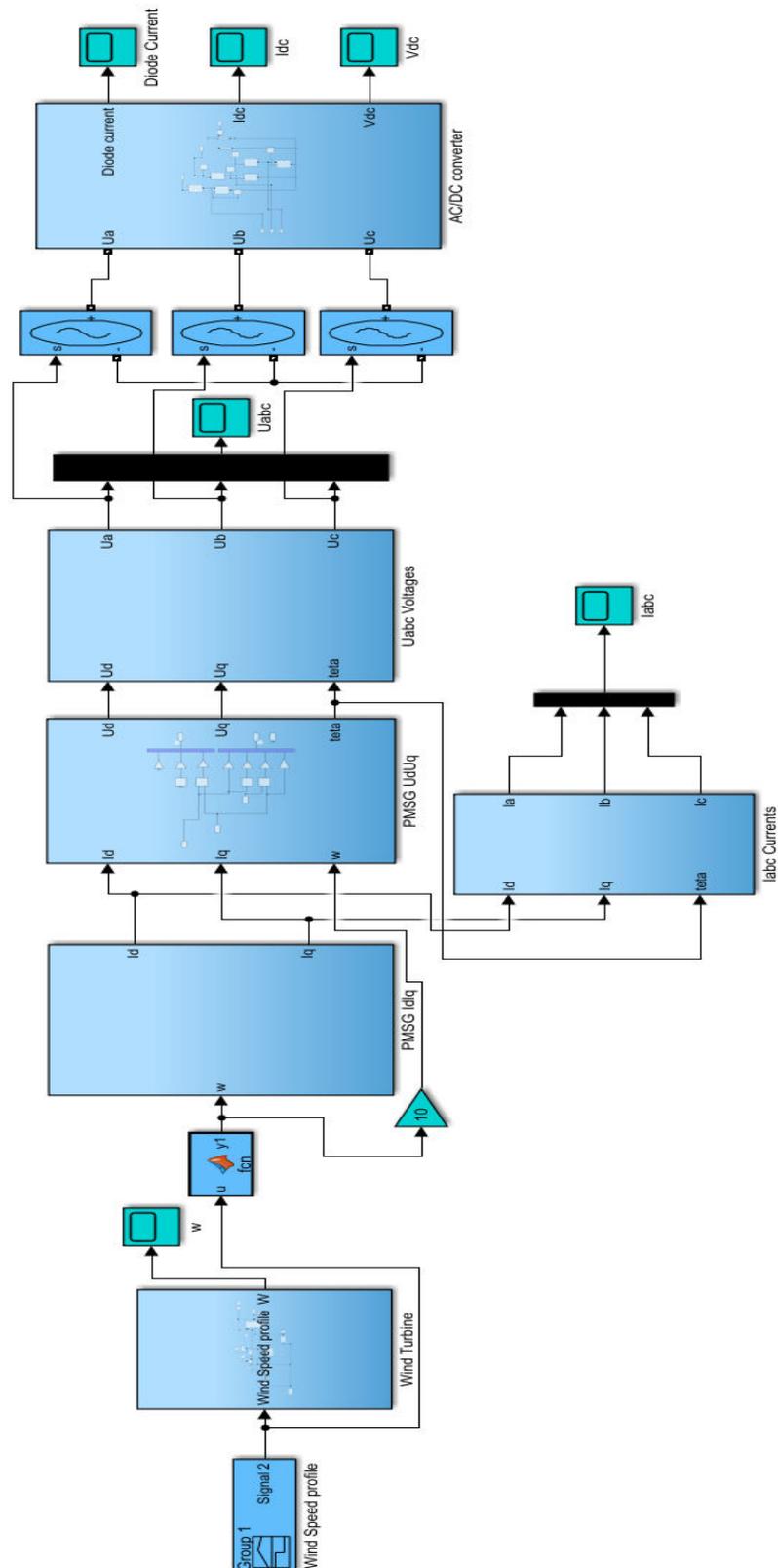


Figure 3.13: Schéma block de l'ensemble (Anelion, PMSG, convertisseur AC/DC)

En remplaçant les expressions de v_d et v_q dans les équations (3.23) et (3.24), on aura le système suivant :

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})i_d + \omega(L_q + L_{ch})i_q] \quad (3.27)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})i_q - \omega(L_d + L_{ch})i_d + \omega\phi_f] \quad (3.28)$$

Pour La modélisation présentée dans la figure 3.13 la charge pour notre modèle est considérée comme une charge résistive (Résistance de 50Ω) ;

Le tableau ci-dessous présente les paramètres de la GSAP :

Paramètre	Valeur
Plage de vitesse	100 tpm - 465 tpm
L_d	0.029 mH
L_q	0.029 mH
Moment d'inertie	1kg m^2
Nombre de paires de pôles	10
Flux magnétique	0.40 Wb
Coefficient de frottement visqueux	0.024 kg m^2/s

Tableau 3.1 Paramètres de modélisation de la PMSG

Les résultats de simulation de cette partie sont présentés comme suit dans les figures 3.14 et 3.15. Dans ces figures, nous représentons en Figure 3.14 les tensions statoriques en fonction du temps et nous représentons en Figure 3.15, les courants statoriques de la GSAP (PMSG). Dans chaque figure, nous effectuons un zoom sur les formes de tensions et courants générés. Il est à noter que l'axe des abscisses est le temps. En effet, pour cette modélisation avec le modèle représenté en Figure 3.13, nous avons pris un profil du vent tel que représenté en Figure 3.10 c'est à dire un profil continu et monotone dans la zone de

fonctionnement de l'éolienne Anelion. Ce choix permet de valider notre modèle Matlab/Simulink sur l'ensemble de la plage fonctionnelle de vitesse de vent.

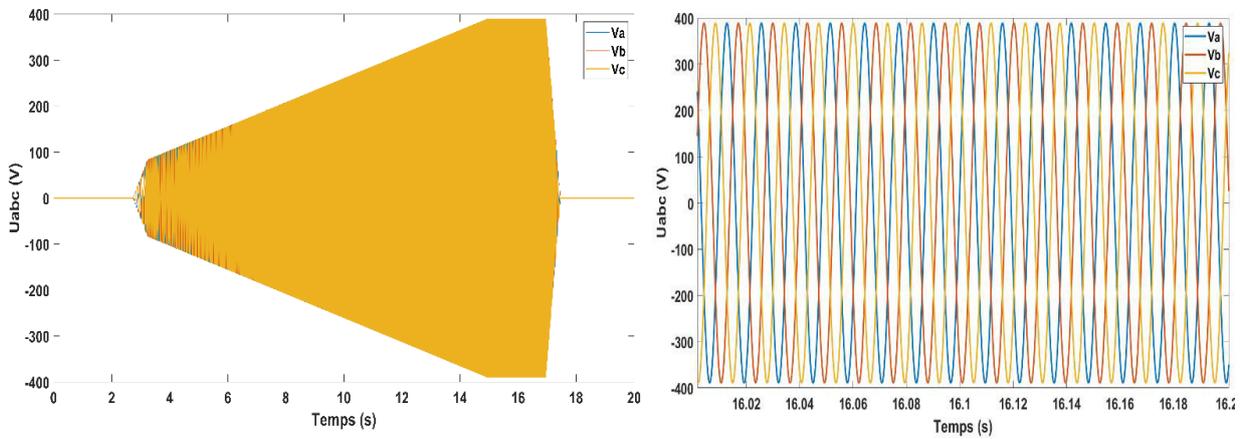


Figure 3.14: Tensions statoriques de la PMSG

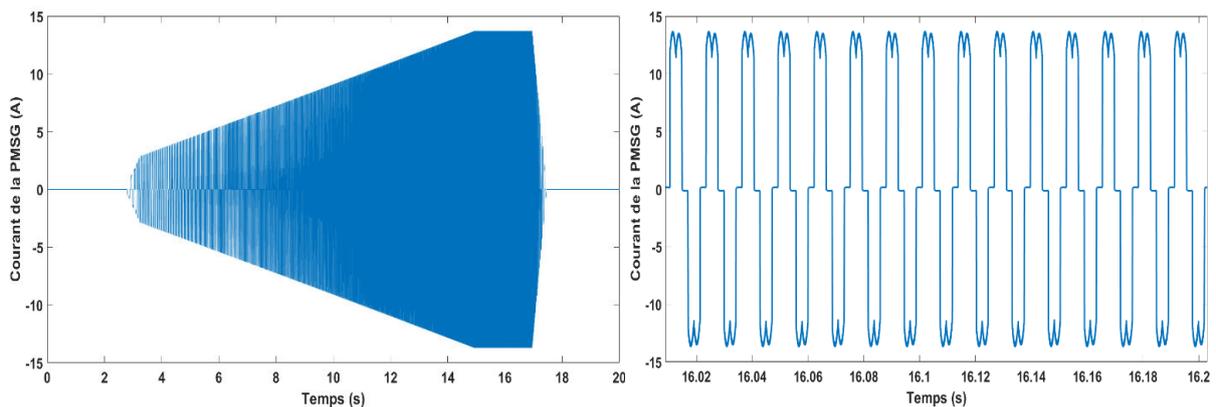


Figure 3.15: Courants statoriques de la PMSG

Nous voyons clairement que les amplitudes de tension et de courant suivent les évolutions de la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent commençant à 3.5 m/s et avec un arrêt à 17 m/s. la forme de la tension, comme le montre la Figure 3.14, possède une forme sinusoïdale pure.

La tension à la sortie du PMSG et le courant de sortie sont représentés sur les figures 3.14, 3.15, Le courant rapporté à la Figure 3.15 est évalué sur une phase à la sortie de la PMSG à l'entrée du redresseur.

6. L'ETAGE DE CONVERSION ELECTRIQUE EN SORTIE D'UNE GSAP

Dans les productions d'énergie électrique d'origine renouvelable, un étage d'adaptation est toujours nécessaire afin de délivrer le maximum de puissance à des niveaux et formes de tension et courant adaptés au réseau de distribution ou directement à la charge. C'est pour cette raison et pour le fait que différents types de configurations « source-charge » existent que de nombreuses études et solutions d'interface de puissance ont été proposées pour répondre à ces besoins. Dans ce paragraphe, nous proposons d'analyser les principales possibilités et solutions techniques pour cet étage de conversion avant de proposer une solution originale appliquée, in fine à la distribution de l'énergie électrique produite par notre éolienne sur un bus à courant continu.

Ainsi, entre l'électrotechnique et l'électronique s'est développée, depuis la deuxième moitié du XXe siècle, une nouvelle technique, l'électronique de puissance, parfois appelée à ses débuts l'électronique des courants forts. La mise au point de semiconducteurs, diodes, thyristors et transistors au silicium, ou au carbure de silicium, permettant le contrôle de courants et de tensions importants a donné un essor considérable à cette nouvelle technique, au point d'en faire aujourd'hui une des disciplines de base du génie électrique. Avant d'aborder l'étude de l'électronique de puissance, il importe d'en dégager la principale caractéristique, de montrer les particularités qui en résultent et de situer le domaine de ses applications.

L'électronique de puissance permet la conversion statique de l'énergie électrique entre une source et un récepteur qui n'ont pas des caractéristiques adaptées. Par exemple, lorsqu'on désire alimenter les moteurs synchrones triphasés de traction d'un métro à partir du rail alimenté en continu, on doit convertir la tension continue du rail en un système triphasé de tensions alternatives d'amplitude et de fréquence variables. Cette modification est assurée par un convertisseur statique [15].

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique. On distingue deux types de sources de tension [16] :

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.

- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V et de la fréquence f

Dans un convertisseur statique, pour obtenir les grandeurs de sorties souhaitées, on agit à l'aide des interrupteurs à semiconducteurs sur les connexions entre la source d'énergie électrique et le récepteur, on provoque ainsi un hachage des grandeurs à leurs accès, grandeurs nécessitant d'ordinaire un filtrage.

Pour la conversion d'énergie on différencie Quatre types de convertisseurs :

- Convertisseur alternatif/continu (AC/DC) **Redresseur** ;
- Convertisseur continu/continu (DC/DC) **Hacheur** ;
- Convertisseur continu/alternatif (DC/AC) **Onduleur** ;
- Convertisseur alternatif/alternatif (AC/AC) **Gradateur** lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, sinon c'est un **Cycloconvertisseur** ;

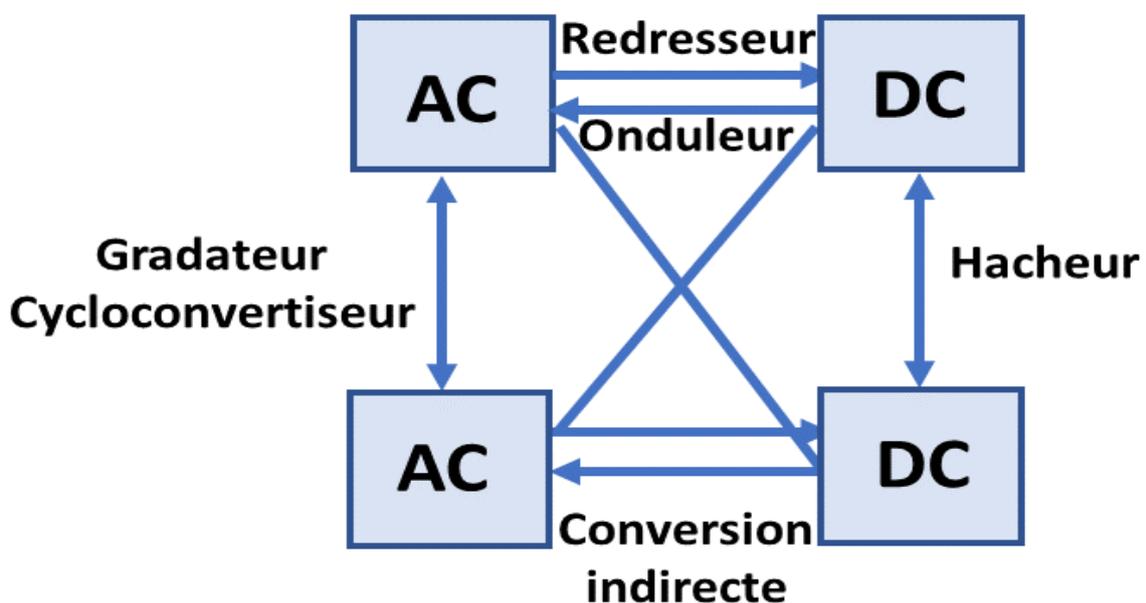


Figure 3.16: Conversion d'Énergie à base des Convertisseurs statiques

Citons quelques applications des convertisseurs statiques :

- **Redresseurs** : alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries ;

- **Hacheurs** : commande des moteurs à courant continu (vitesse variable) ; fonctions d'interrupteur onduleurs ou alimentation à découpage ;
- **Onduleurs** : production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines à courant alternatif ;
- **Cycloconvertisseurs** : production des vitesses variables en alternatif (levage, machine-outil)

6.1. CONVERSION ALTERNATIF/CONTINU (AC/DC)

Les redresseurs à diodes et à thyristors assurent une conversion alternatif/continu. Alimentés à partir du réseau monophasé ou triphasé, ils fournissent à leur sortie une tension continue de valeur fixe ou variable, soit pour alimenter directement un récepteur, soit pour alimenter un autre convertisseur [17].

On peut grouper les composants utilisés dans les convertisseurs statiques AC- DC en deux catégories :

- Les diodes (**pour un redressement non commandé**)
- Les thyristors (**pour un redressement commandé**)

6.1.1. LES DIODES

Une diode est un élément non commandé composé de 2 couches de matériaux semi-conducteur dopé (Silicium ou germanium) ; Le dopage permet d'obtenir des semi-conducteurs à trous chargés positivement ou chargé de porteuses négatives.

Les caractéristiques statiques d'une diode sont représentées dans la Figure 3.17 page suivante.

Le point repéré par **VF**, correspond à la prédominance du champ électrique **E**, dû à la tension de polarisation, sur le champ électrique **e**, de la barrière de potentiel et permettant le passage important des électrons libres de la zone **N** vers la zone **P**.

L'axe du courant représente le courant direct **ID** ou courant des porteurs majoritaires.

L'axe des tensions représente la tension directe appliquée à la diode.

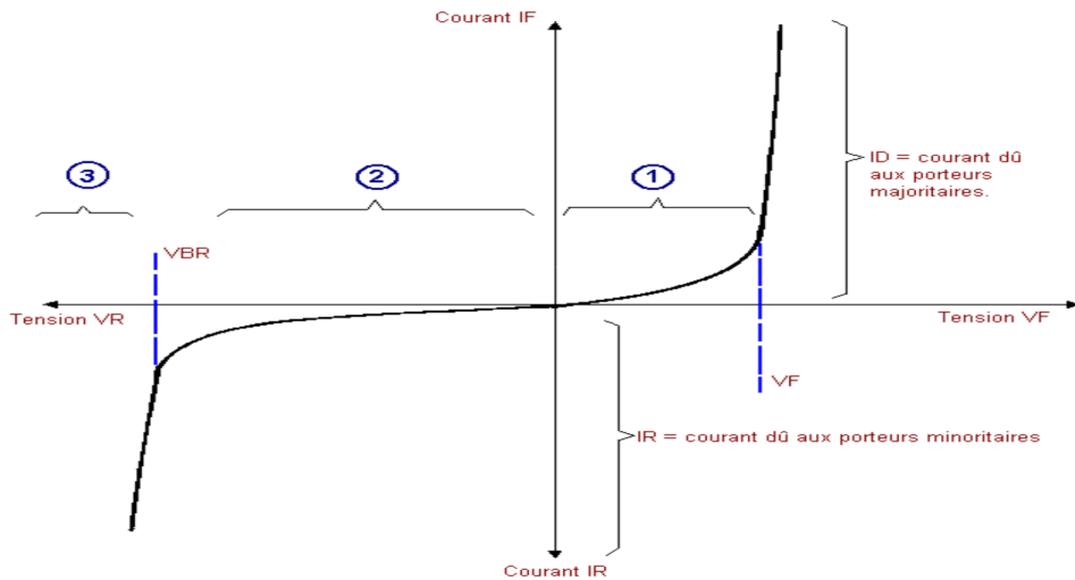


Figure 3.17: Caractéristiques statiques d'une diode

Les zones **2** et **3** correspondent à la polarisation dans le sens bloqué, ou polarisation inverse.

La zone **2** est la caractéristique inverse utilisable pour une diode de redressement. Dans ce cas, il ne faut pas atteindre la tension d'avalanche **VBR**, Le courant inverse est dû aux porteurs minoritaires. En principe dans cette zone, à température fixe, il est théoriquement constant, mais des phénomènes secondaires tendent à augmenter légèrement celui-ci.

La zone **3** est marquée par le point **VBR** sur l'axe des tensions inverses. Il correspond à une énergie transmise aux électrons porteurs minoritaires par le champ électrique **E** (engendré par la tension de polarisation inverse), augmenté du champ électrique **e** (engendré par la barrière de potentiel), telle que, ceux-ci, en arrivant dans la zone **N**, arrachent des électrons dans le maillage du réseau, qui à leur tour, sont accélérés par ce champ et vont libérer d'autres électrons du maillage avant d'atteindre la cathode (électrode de la zone **N**).

6.1.2. LES THYRISTORS

Le thyristor est un élément semi-conducteur assez similaire à la diode à jonction, utilisée pour le redressement du courant alternatif. Comme la diode, il laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'anode (A) à la cathode (K). Cependant, le thyristor possède une troisième électrode : la gâchette (G, en anglais gate).

Le thyristor ne conduira que si un courant minimum et positif est fourni à la gâchette, On pourrait résumer en disant que le thyristor est une diode commandée et plus précisément une diode de redressement commandée. La figure ci-dessous représente les caractéristiques de fonctionnement d'un thyristor :

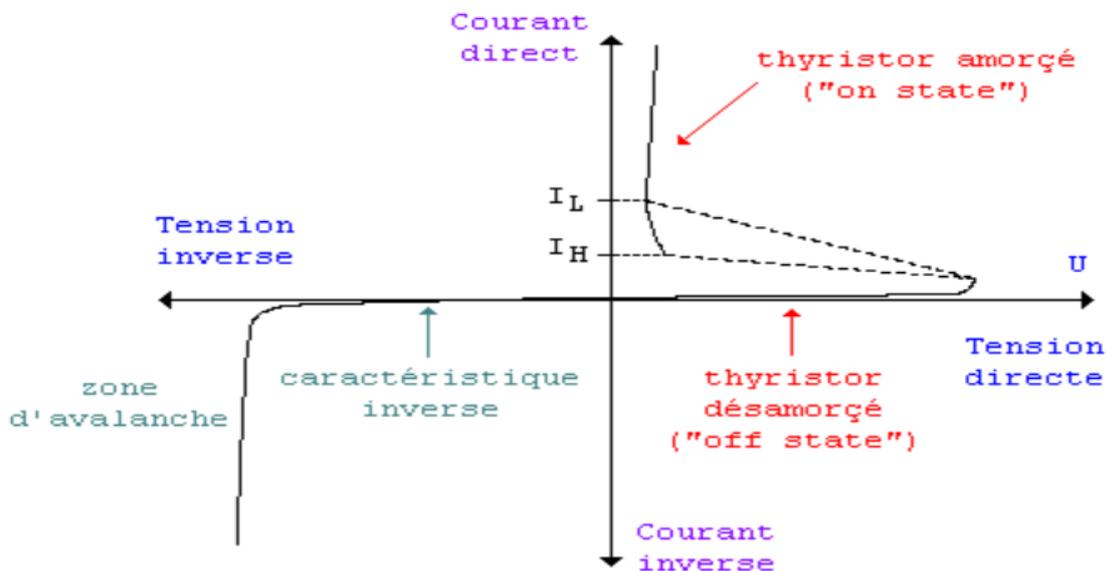


Figure 3.18: Caractéristiques de fonctionnement d'un thyristor

Le thyristor ne conduit, que lorsqu'il est "amorcé". L'amorçage, par le courant de gâchette, peut se faire en courant continu. Il suffit de fermer l'interrupteur de commande pendant un court instant pour obtenir un courant de gâchette de faible valeur. A partir de ce moment le thyristor s'amorce (on dit en anglais qu'il est on state) et reste amorcé, même après ouverture de l'interrupteur. Dans la pratique, l'interrupteur est souvent un générateur d'impulsions.

On désamorce le thyristor en faisant chuter la tension anode-cathode : dès que le courant descend en dessous du courant de maintien, le thyristor ne conduit plus (on dit en anglais qu'il est off state).

Pour rendre un thyristor conducteur (on state), on doit d'abord lui injecter un courant de gâchette suffisant. Ensuite, tant que le courant dans la charge reste supérieur à I_L (L pour latch, verrou), et même en l'absence de courant de gâchette, le thyristor continue de conduire. Pour le bloquer, le courant dans la charge doit descendre sous une valeur I_H (H pour hold, maintien) pendant un temps suffisant [18].

6.2. CONVERSION CONTINU/CONTINU (DC/DC)

Un convertisseur DC/DC a pour vocation d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu, pour alimenter un appareil spécial comme par exemple un chargeur pour téléphone portable, une radio, un ordinateur portable, Il existe deux catégories de convertisseurs DC/DC :

- Les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension ;
- Les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension ;

6.2.1. CONVERTISSEURS VERS LE HAUT (CONVERSION DC/HVDC)

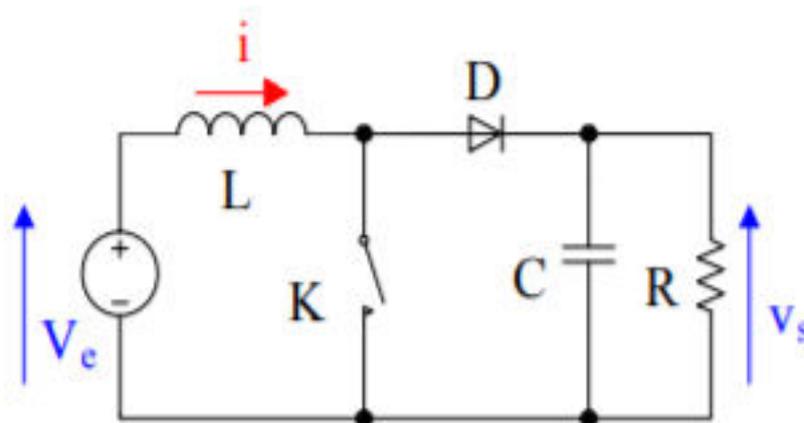


Figure 3.19: Convertisseur DC/DC boost

Ces types de convertisseurs sont appelés aussi convertisseurs boost, le fonctionnement de tels convertisseurs est présenté sur la figure (3.19) ci-dessous ;

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke le courant provenant de la batterie ; lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui est dérivée dans le condensateur et le récepteur ; la diode empêche tout retour de courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie et l'interrupteur est commandé par une électronique de contrôle qui mesure en permanence la tension et le courant de sortie pour ajuster la fréquence et la largeur de commande de l'interrupteur et limiter le courant à une valeur sûre pour les composants. Le rendement typique dépasse en général 70% et peut atteindre 85 à 90% pour les meilleurs convertisseurs [19].

6.2.2. CONVERTISSEURS VERS LE BAS (CONVERSION HVDC/DC)

Aussi appelés convertisseurs buck, ils servent à produire une tension plus basse que celle des batteries, la figure (3.20) ci-dessous présente le principe de fonctionnement de ce type ;

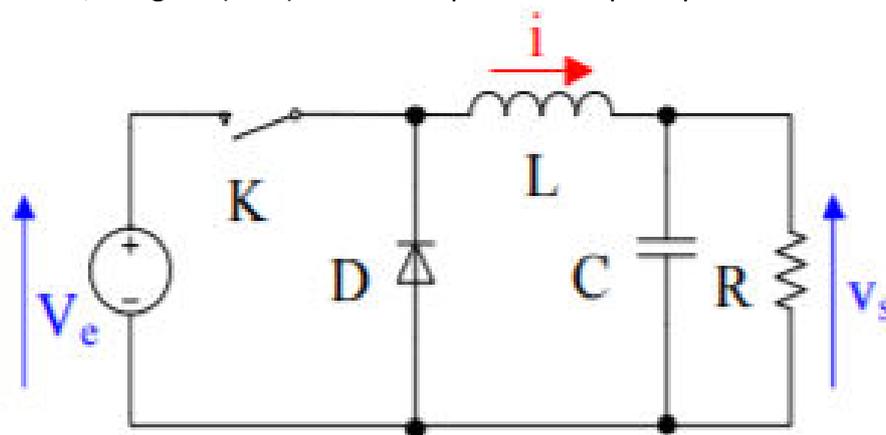


Figure 3.20: Convertisseur DC/DC buck

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant circule de la batterie vers le récepteur à travers l'inductance et lorsque l'interrupteur s'ouvre, la tension aux bornes de l'inductance s'inverse, ce qui fait conduire la diode qui protège la batterie. L'électronique de contrôle commande la fréquence et la durée de fonctionnement de l'interrupteur en fonction de la tension désirée et du courant maximal possible. Le rendement typique est ici légèrement supérieur au modèle précédent et est en général de 80 à 90% pour les appareils modernes [19].

6.3. CONVERSION CONTINU/ALTERNATIF (DC/AC)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu/alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif, c'est-à-dire de valeur moyenne nulle, ou un système polyphasé de telles grandeurs [17].

La structure d'un onduleur dépend essentiellement de la nature des sources entre lesquelles il est monté. Comme il faut respecter l'alternance des sources à ses accès, on distinguera donc :

- Les onduleurs de tension reliant une source de tension continue à une source de courant alternatif,
- Les onduleurs de courant placés entre une source de courant continu et une source de tension alternative.

Les onduleurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 230V/50 Hz ou 380V/50 Hz. Les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou encore une onde dite pseudo-sinusoïdale. Le choix de l'onduleur va dépendre des appareils qu'il devra faire fonctionner, ce choix s'appuyant sur des critères valables pour n'importe quelle onde.

Le choix d'un onduleur autonome doit être basé sur l'assurance que [19] :

- Une solution en DC souvent plus économe en énergie n'existe pas ;
- La consommation éventuelle en mode d'attente (stand-by) ne pénalise pas trop l'installation solaire ;
- L'onduleur peut démarrer le récepteur (seul un essai est vraiment relevant) ;
- Son rendement est suffisant au point de fonctionnement de la charge ;
- La charge tolère la distorsion de l'onduleur (forme d'onde) ;
- Les variations de la tension de sortie sont acceptées par la charge [20] ;

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est illustré sur la figure 3.21, page suivante.

Par une étude rapide de la structure, nous constatons que les interrupteurs placés sur le même bras, K1 et K3, doivent fonctionner de manière complémentaire [21]. En

alternant la commutation des interrupteurs, nous fabriquons une tension alternative. Suivant le type de charge, inductive ou capacitive, le déphasage du courant sur la tension sera respectivement positif ou négatif. Un onduleur de tension triphasé est réalisé par l'association de trois bras d'onduleur (figure 3.21 b). Les commandes sont décalées d'un tiers de période afin de créer aux bornes de la charge un système de tensions triphasées.

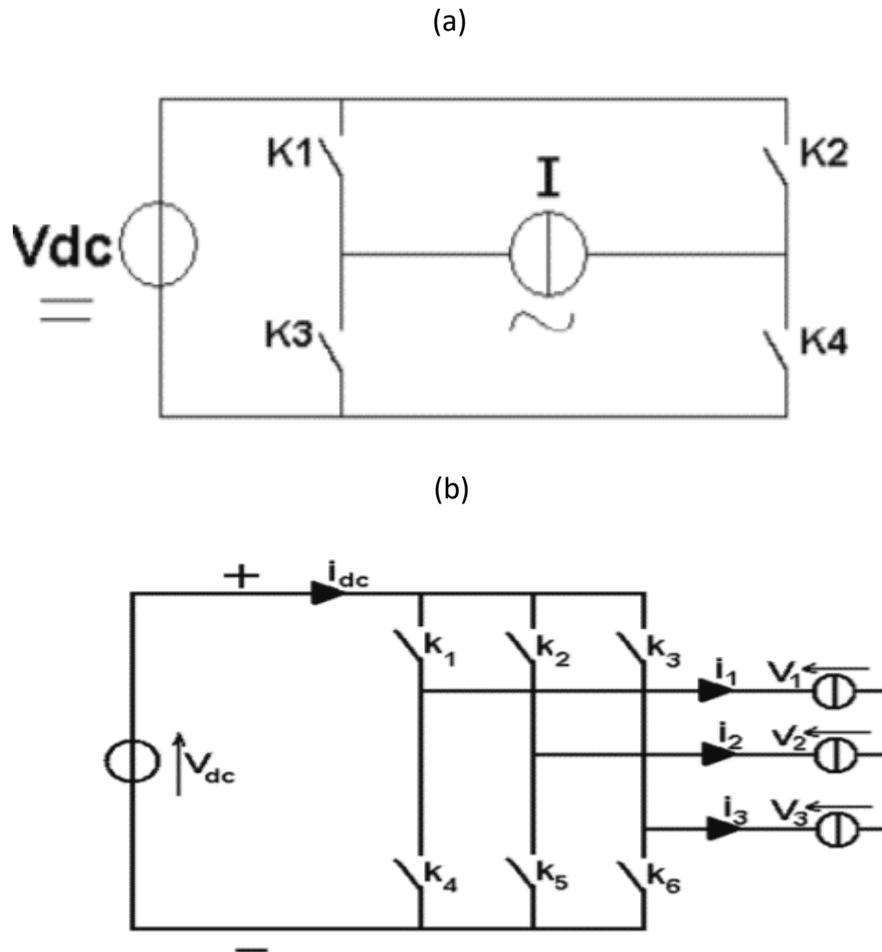


Figure 3.21: Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension (a) monophasé (b) triphasé

6.4. CONVERSION ALTERNATIF/ALTERNATIF (AC/AC)

Les convertisseurs alternatif-alternatif servant à commander le débit d'une source alternative dans un récepteur alternatif sans changer de fréquence. Ils permettent d'assurer la liaison constante entre la source et la charge puis de l'interrompre ; c'est la marche en interrupteur. Ils permettent aussi de rendre intermittente cette liaison et, par-là, de régler

l'intensité du courant que la source débite dans le récepteur ; c'est le fonctionnement en gradateur [17].

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur AC/AC est comme suit, figure 3.22.

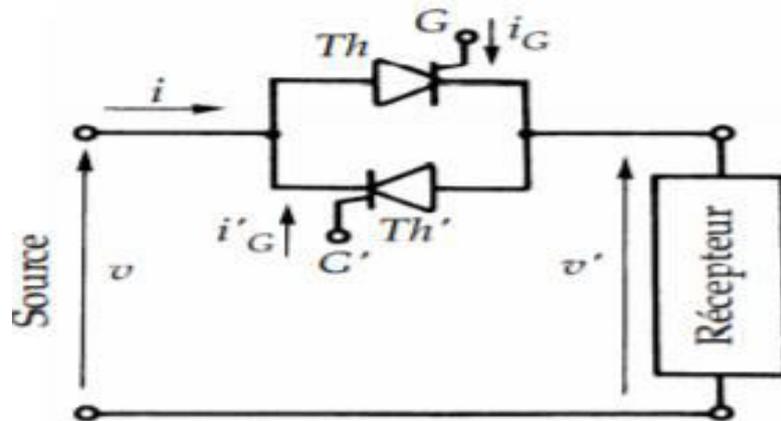


Figure 3.22: Principe de fonctionnement d'un convertisseur AC/AC

À partir de l'instant où on veut fermer l'interrupteur, on envoie en permanence des signaux de déblocage sur les gâchettes des deux thyristors. À cet instant, Th conduit si v est positif ; c'est Th' qui conduit si v est négatif. Quand le courant i change de signe, il passe d'un thyristor à l'autre. Si on néglige la chute de tension directe des thyristors, la tension v' aux bornes de la charge est égale à v . Pour ouvrir l'interrupteur, on cesse d'envoyer des signaux de déblocage aux deux thyristors. Celui qui conduit continuera d'écouler le courant i jusqu'à ce que celui-ci s'annule, puis i reste nul.

Le montage de la figure 3.22 et ses variantes unipolaires permettent aussi de régler la valeur efficace I qu'une source de tension alternative donnée débite dans un récepteur donné. Ce fonctionnement en gradateur – on dit parfois en modérateur – ne diffère de celui en interrupteur que par le mode d'action sur les gâchettes : au lieu d'appliquer ou de supprimer les signaux de déblocage, on déphase ces signaux. On agit ainsi sur la durée des intervalles où, pendant chaque alternance de la tension d'entrée, les semiconducteurs relient la source au récepteur.

Le gradateur triphasé proprement dit, qui nécessite six thyristors montés par groupes de deux dans la liaison entre la source et le récepteur. La détermination des caractéristiques des gradateurs triphasés donne lieu à des calculs assez longs car, comme vient de le montrer l'examen du simple montage monophasé, les gradateurs sont des convertisseurs semi-

commandés ne respectant pas la règle de l'alternance des sources. Si, côté entrée on peut admettre que le réseau se comporte en source de tension alternative sinusoïdale, côté sortie on ne peut supposer qu'il y a une source de courant sinusoïdale ; les courants y sont aussi déformés qu'à l'entrée, ce sont d'ailleurs les mêmes.

6.5. REDRESSEMENT NON COMMANDE (DIODES)

Pour de nombreuses applications où on a besoin d'une tension redressée, on se contente d'un redresseur à diodes débitant sur une capacité. On branche le récepteur aux bornes de celle-ci. La capacité peut être considérée comme une source de tension. Le réseau alimentant le redresseur étant lui aussi considéré comme une source de tension, on demande au convertisseur de relier deux sources de tension. Ce n'est pas possible même avec des diodes si ces deux sources sont parfaites. On doit utiliser l'imperfection des sources ou, si cette imperfection est insuffisante, l'augmenter.

Ce mode de conversion conduit à une valeur moyenne de la tension redressée variable avec le débit. Ce n'est pas gênant lorsque le redresseur alimente un autre convertisseur, hacheur ou onduleur, pour lequel la constance de la tension continue d'alimentation n'est pas indispensable [22].

En triphasé, on utilise le schéma en pont (figure 3.23) Le montage le plus utilisé est le montage en pont, ou parallèle double PD3 dit aussi montage en pont de Graëtz triphasé. Ce montage peut être considéré comme résultant de l'association convenablement menée d'un montage à anodes communes et d'un montage à cathodes communes.

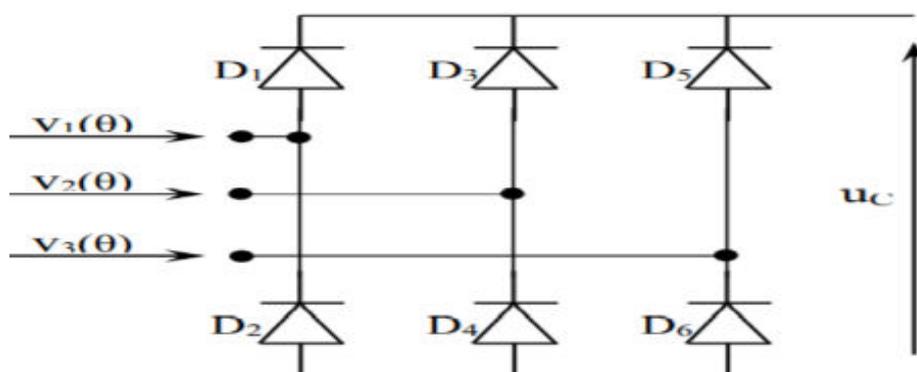


Figure 3.23: Redresseur triphasé PD3

L'étude d'un montage doit servir, pour le concepteur, à déterminer les caractéristiques de chaque élément constitutif (diodes, thyristors), Elle doit également permettre de calculer et définir les protections contre des échauffements dus à des surtensions ou sur courants (dus à des courts-circuits) éventuels.

On procède en général en deux étapes :

6.5.1. ETUDE DES TENSIONS (DE L'ENTREE VERS LA SORTIE) :

En partant des tensions alternatives à l'entrée, on calcule la tension redressée à vide et la tension maximale aux bornes des semi-conducteurs. Pour cette étude on suppose négligeables les impédances de la source et des éléments du montage, ce qui est réaliste compte tenu des faibles chutes de tension qu'elles occasionnent.

6.5.2. ETUDE DES COURANTS (DE LA SORTIE VERS L'ENTREE)

A partir du courant débité supposé continu, on calcule la valeur du courant dans les semi-conducteurs ainsi que dans les enroulements secondaires et primaires du transformateur. Les chutes de tension dues aux impédances citées précédemment sont négligées.

7. L'ETAGE DE CONVERSION DC/HVDC RETENU DANS L'ETUDE

La topologie la plus simple pour la conversion des systèmes d'énergie éolienne est basée sur le redresseur PD3. Cette topologie de convertisseur est généralement utilisée pour les applications de haute puissance [22],

Le redresseur utilisé pour notre modélisation est un PD3, représenté en figure 3.23. La tension redressée à la sortie du redresseur est exprimée par [22] :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{ac} \quad (3.29)$$

Nous avons développé un model Matlab/Simulink pour ce convertisseur tel qu'intégré dans la Figure 3.13. Nous représentons dans les figures 3.24 et 3.25 la réponse du système complet turbine-génératrice-redresseur en présentant les tensions et courants en sortie du système pour un profil de vent évoluant de façon continu et monotone dans la zone de fonctionnement de l'éolienne.

A partir des figures 3.24 et 3.25, on constate que la tension et le courant à la sortie du redresseur PD3 suivent l'entrée du modèle (vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent), les harmoniques résiduelles dans la tension et le courant à la sortie du redresseur atteint 10% au maximum de la tension totale, et d'amplitude du courant.

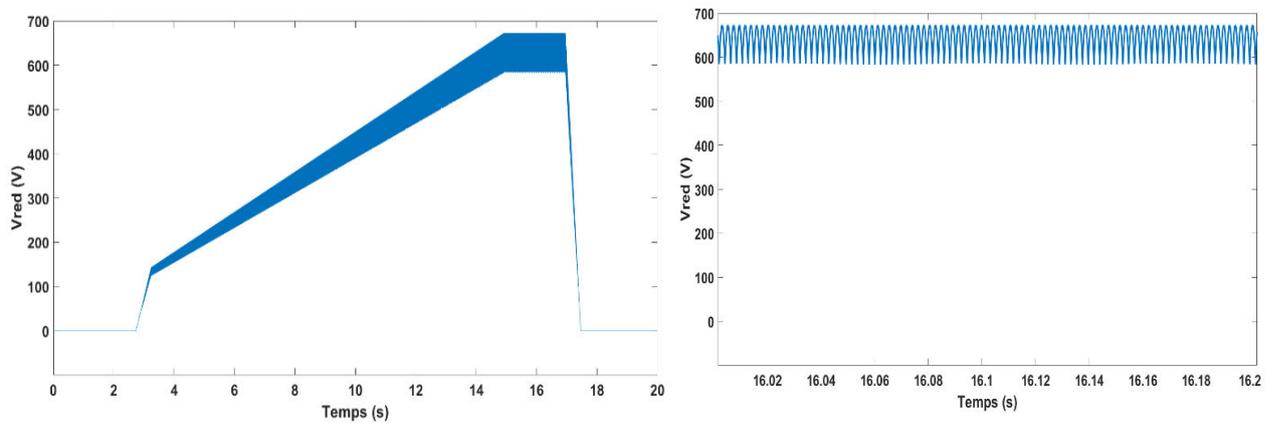


Figure 3.24: Tension redressée du convertisseur AC/DC

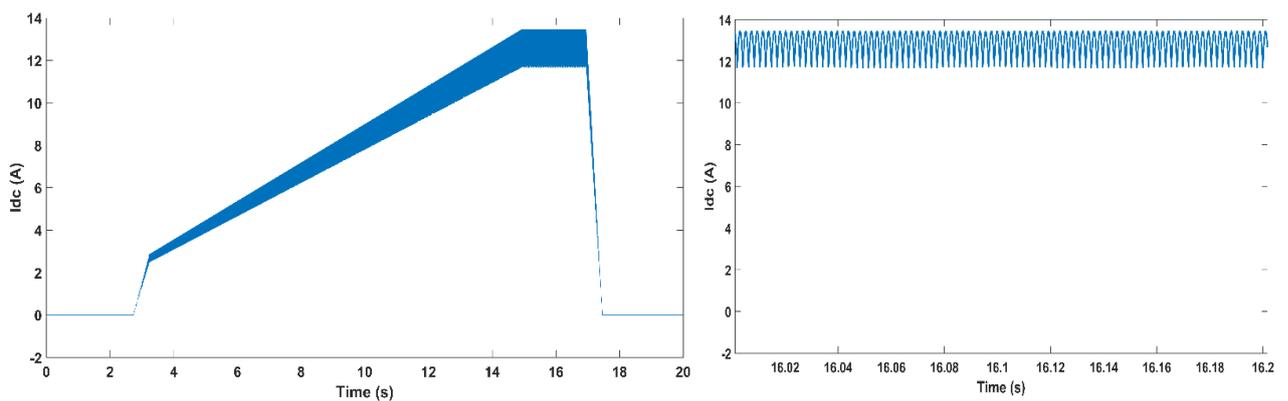


Figure 3.25: Courant redressé du convertisseur AC/DC

Ces résultats prouvent la possibilité de modéliser un système de conversion d'énergie éolienne par optimisation de la réponse de la turbine avec les données fournies par le fabricant sans qu'il soit nécessaire d'introduire un système de suivie complexe pour la gestion du point de puissance maximum, sachant que celui-ci est directement considéré en amont lorsque la vitesse de rotation de la turbine est tracée en fonction de la vitesse du vent.

Afin d'utiliser ce modèle d'éoliennes comme modèle autonome pouvant couvrir les besoins en électricité d'une charge spécifique, ou connecté au réseau directement après le passage via un onduleur, il faudra alors envisager une valeur de tension de sortie constante qui peut être assurée par une batterie ou un super-condensateur via un système composé d'un chargeur et d'un convertisseur boost DC/DC ou un système buck-boost. En mode de fonctionnement non contraint par un niveau de tension de sortie imposé ou fixé par une Source DC, la tension de sortie AC est contrôlée en termes d'amplitude et de fréquence directement en considérant la réponse de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent.

Néanmoins, en mode de fonctionnement normal dans un système autonome, un réseau électrique DC peut être envisagé avec le niveau de la tension de sortie garanti constant grâce à un système de sauvegarde d'énergie de type batterie associé à un système de contrôle de charge et de décharge. Mais dans le cas de source autonome AC pour être connecté au réseau de distribution AC, la puissance de l'éolienne PMSG est ensuite fournie au convertisseur AC/DC puis à l'onduleur DC/AC dont la sortie sera une tension AC, la tension de sortie ayant une amplitude déterminée et constante qui peut également être fournie par une tension de niveau constant, qui en plus en fonction de la puissance disponible généré par la chaîne éolienne, complétera le nécessaire de puissance demandée par la charge.

8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la partie de modélisation de l'éolienne ainsi que la PMSG, et le redresseur PD3, nous avons présentés aussi les différentes parties de

conversion de l'énergie, en clôturant avec la topologie du redresseur PD3 lequel utilisé pour la modélisation de la chaîne éolienne.

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l'efficacité de la stratégie de commande utilisée dans notre modèle. Grâce à cette stratégie nous avons réussi à modéliser la chaîne éolienne jusqu'au redresseur PD3 à partir de la fiche technique donnée par le fabricant, Le modèle de la chaîne éolienne-PMSG-AC/DC présenté dans ce chapitre, peut maintenant être utilisé comme source d'énergie des systèmes plus complexe présentés sur (la figure 3.1).

Le chapitre suivant est consacré à la deuxième partie de conversion le boost (DC/DC) et le stockage d'énergie, via une batterie et un super-condensateur.

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE III

- [1] A. Boyette, « Contrôle-Commande d'une GADA avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat, Université Henry Poincare, Nancy I., (2006).
- [2] History of Wind Energy. (2004). Encyclopaedia of Energy. Vol. 6, p. 420.
- [3] Nercon German Wind Turbine Manufacturer, available at: <http://www.enercon.com>.
- [4] H. Kun, Guo-zhu C: A Novel Control Strategy of Wind Turbine MPPT Implementation for Direct-PMSG Wind Generation Imitation Platform, IEEE,2009, 978-1-4244-3557
- [5] A. Bechouche, « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : application à une éolienne » ; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2013.
- [6] B. Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable » ; Thèse de Doctorat, Université Paris XI, 2006.
- [7] C. Eisenhut, F. Krug, C. Schram, et B. Klöckl « Wind turbine model for system simulations near cut-in wind speed ». IEEE Transaction, on Energy Conversion, , vol 22 (no. 2): p.414-420, 2007.
- [8] M. Bergey, T. Bartholf, D. Blottersdorf, A. Caldwell, D . Calley , C. Hansen, B .Markee, V .Nelson, G. Norton, and R. Sherwin: Technical Report, The U.S. Small Wind Turbine Industry, Roadmap,A20-year industry plan for small wind turbine technology, American Wind Energy, Association, Small Wind Turbine Committee.2003
- [9] W. E. Leithead, B. Connor, Control of Variable Speed Wind Turbines: Design Task, International Journal of Control, 2000, Vol. 73(13), pp. 1189-1212
- [10] Y. Daili ; « Contribution à la Commande d'une Petite éolienne Destinée à l'Electrification des Sites Isolés » ; thèse de Doctorat en Sciences ; université Ferhat Abbes de Sétif 1
- [11] S. Hamecha, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister ; université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2013.

- [12] I. Meghlaoui ; « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal » ; mémoire de Magister ; université Bdji Mokhtar de Annaba ; 2009.
- [13] R. ABDESSEMED, Livre : Modélisation et simulation des machines électriques 2011, chapitre 5 : Modélisation et Simulation des Machines Synchrones à aimants permanents.
- [14] F. Lourad ; « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » thèse de doctorat ; université Badji Mokhtar de Annaba ; 2016.
- [15] N. BELHAOUCHET, « Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées », thèse de universite ferhat abbas – setif 2011.
- [16] I. Hidri., D'électronique de puissance Les convertisseurs AC-DC et AC-AC, Technologue à l'ISET de Nabeul.
- [17] G. Séguier, F. Labrique, P. Delarue, Livre : Electronique de puissance : « Structures, commandes, applications », 2015
- [18] Thyristors, triacs, opto-triacs et diacs, site web.
- [19] A. Labouret, M. Viloz. Energie Solaire Photovoltaïque. Dunod, 3e Edition, 2006.
- [20] B. Bogno, Contribution au développement des systèmes, technologies et matériaux pour une exploitation optimale des énergies renouvelables en Afrique subsaharienne, 2017
- [21] G. SEGUIER, Electronique de puissance. Paris: Dunod, 2004. 424 p. ISBN: 2-100-48500-8
- [22] M.H. Rashid: Power Electronics Circuits, Devices, and Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.

CHAPITRE IV

Etude et modélisation d'une source éolienne avec stockage couplée à un bus HVDC

Chapitre IV

Etude et modélisation d'une source éolienne avec stockage couplée à un bus HVDC

SOMMAIRE DU CHAPITRE IV

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE IV	139
1. INTRODUCTION.....	141
2. LA CONVERSION DC/DC -GENERALITES.....	143
3. LA CONVERSION DC/DC POUR LA CHAINE EOLIENNE	144
4. LE STOCKAGE D'ENERGIE-GENERALITES.....	147
5. LE STOCKAGE D'ENERGIE POUR LA CHAINE EOLIENNE.....	164
6. LE SYSTÈME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE AVEC STOCKAGE CONNECTÉ AU BUS HVDC	168
7. CONCLUSION	186
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE IV	187

TABLE DES FIGURES DU CHAPITRE IV

Figure 4.1: Couplage entre batterie et super-condensateur	142
Figure 4.2: Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost	144
Figure 4.3: La commande du convertisseur Boost sous Matlab/Simulink.....	146
Figure 4.4: Diagramme de Ragone.....	147
Figure 4.5: Stockage d'énergie par air comprimé	149
Figure 4.6: Différents Types de stockage d'énergie	151
Figure 4.7: Schéma électrique d'une batterie.....	157
Figure 4.8: Différence entre un condensateur classique (a) et un super-condensateur (b) .	159
Figure 4.9: Schéma bloc Matlab/Simulink du modèle de stockage par batteries.	165
Figure 4.10: Schéma bloc Matlab/Simulink du modèle de stockage par super-condensateur.	166
Figure 4.11: Schéma bloc Matlab/Simulink du contrôle du convertisseur Boost de stockage.	167
Figure 4.12: Schéma bloc Matlab/Simulink du contrôle du convertisseur Buck de stockage.	167
Figure 4.13: Schéma bloc Matlab/Simulink de la commande du contrôle des convertisseurs	168
Figure 4.14: Schéma bloc du système complet éolien + stockages connectés au bus HVDC	169
Figure 4.15: Profil du vent utilisé pour l'étude statique	170
Figure 4.16: Tension du bus HVDC pour une vitesse fixe de 12 m/s	171
Figure 4.17: Courant délivré par l'éolienne pour une vitesse fixe de 12m/s.....	171
Figure 4.18: Courant du bus DC pour une vitesse fixe de 12m/s.....	171
Figure 4.19: Zoom de la tension de la batterie au plomb.....	172
Figure 4.20: Courant de la batterie au plomb	172
Figure 4.21: Zoom sur la tension du super-condensateur	173
Figure 4.22: Le courant du super-condensateur	173
Figure 4.23: Profil du vent utilisé pour l'étude dynamique	174
Figure 4.24: Tension du bus DC pour l'étude dynamique.....	175
Figure 4.25: Zoom de la tension du bus DC pour l'étude dynamique	175

Figure 4.26: Courant délivré par l'éolienne pour l'étude dynamique	175
Figure 4.27: Zoom du courant délivré par l'éolienne pour l'étude dynamique.....	176
Figure 4.28: Courant du bus DC pour l'étude dynamique	176
Figure 4.29: Zoom du courant de bus DC pour l'étude dynamique.....	177
Figure 4.30: Zoom de la tension de la batterie au plomb	177
Figure 4.31: Courant de la batterie au plomb pour l'étude dynamique.....	178
Figure 4.32: Tension du super-condensateur pour l'étude dynamique	178
Figure 4.33: Courant du super-condensateur pour l'étude dynamique.....	178
Figure 4.34: Profil du vent variable de façon continue et aléatoire	180
Figure 4.35: Courant redressé en sortie de l'étage éolien en mode de fonctionnement réel.	180
Figure 4.36: Tension de la batterie pour le mode de fonctionnement réel	182
Figure 4.37: Courant de la batterie pour le mode de fonctionnement réel	182
Figure 4.38: Tension du super-condensateur pour le mode de fonctionnement réel	183
Figure 4.39: Courant du super-condensateur pour le mode de fonctionnement réel.....	183
Figure 4.40: Tension du bus HVDC pour l'étude réelle	184
Figure 4.41: Zoom de Tension du bus HVDC pour l'étude réelle.....	184
Figure 4.42: Courant du bus DC en mode de fonctionnement réel.....	185
Figure 4.43: Zoom du courant de bus DC en mode de fonctionnement réel	185

1. INTRODUCTION

Dans un système de type réseau ou micro-réseau (grid ou micro-grid) de distribution d'électricité, voire d'un réseau intelligent (smart-grid), le stockage est un élément indispensable afin de pouvoir délivrer la puissance optimum produite par une source d'énergie renouvelable. La partie stockage permet alors la conservation de l'énergie produite par l'éolienne ou le PV en attente pour une utilisation ultérieure mais permet également le maintien de la tension du bus à un niveau constant et prédéterminé indépendamment de la valeur du point de puissance maximum délivré par la source. Ainsi, le stockage de l'énergie devient un élément incontournable pour assurer la bonne gestion des ressources disponibles et sa nécessité s'impose si l'on veut pouvoir disposer de l'électricité même si la production est nulle comme par exemple dans le cas d'une éolienne en l'absence de vent ou de panneau photovoltaïque la nuit [1]. La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, que la demande des appareils d'utilisation soit continue ou discontinue. L'apport énergétique solaire et éolien est périodique et aléatoire (alternances jour/nuit, été / hiver, relatif à l'ensoleillement ou à la vitesse du vent).

Le stockage de l'électricité quand à lui répond à trois grands types de besoins :

- Ceux liés à la production nucléaire, centralisée, massive et peu adaptative. C'est le cas de la gestion, sur le réseau de transport, de l'énergie électrique produite par les centrales actuelles, afin d'équilibrer en temps réel la production et les demandes variables journalière, hebdomadaire, saisonnière. De plus, il s'agit également de sécuriser cette énergie face aux fluctuations d'une production importante et nécessairement intermittente de l'énergie électrique d'origine renouvelable.

- Ceux liés à la production autonome décentralisés et de quantité plus modeste. L'électricité créée, en général par des sources variables (solaire, éolien) dans le cas de maisons autonomes (non raccordées au réseau) a besoin d'être stockée car souvent il existe un décalage entre les heures de production et les heures de consommation [2]

- Ceux liés à des applications mobiles (téléphone portable, transports du type vélo à assistance électrique, automobile électrique ou hybride).

Les besoins n'étant pas les mêmes, il va exister différentes solutions adaptées aux différents besoins. On notera qu'il est possible de stocker l'énergie sous forme électrique, chimique, thermique, mécanique, électromagnétique, électrochimique et dans des solutions hybrides regroupant plusieurs des technologies citées ci-dessus.

Dans ce dernier chapitre on étudie, dans une première partie, la suite de la conversion de l'électronique de puissance (la partie DC/DC) permettant l'alimentation d'un bus à haute tension continue. Ce travail repose sur la topologie du système étudié en autonome, sans connexion à un bus de distribution ni à un stockage et tel qu'il a été présenté dans le chapitre précédent. Dans une deuxième partie nous présenterons la partie de stockage hybride retenue pour cette étude. Pour cette partie, nous avons choisi de baser le système sur un super-condensateur et une batterie.

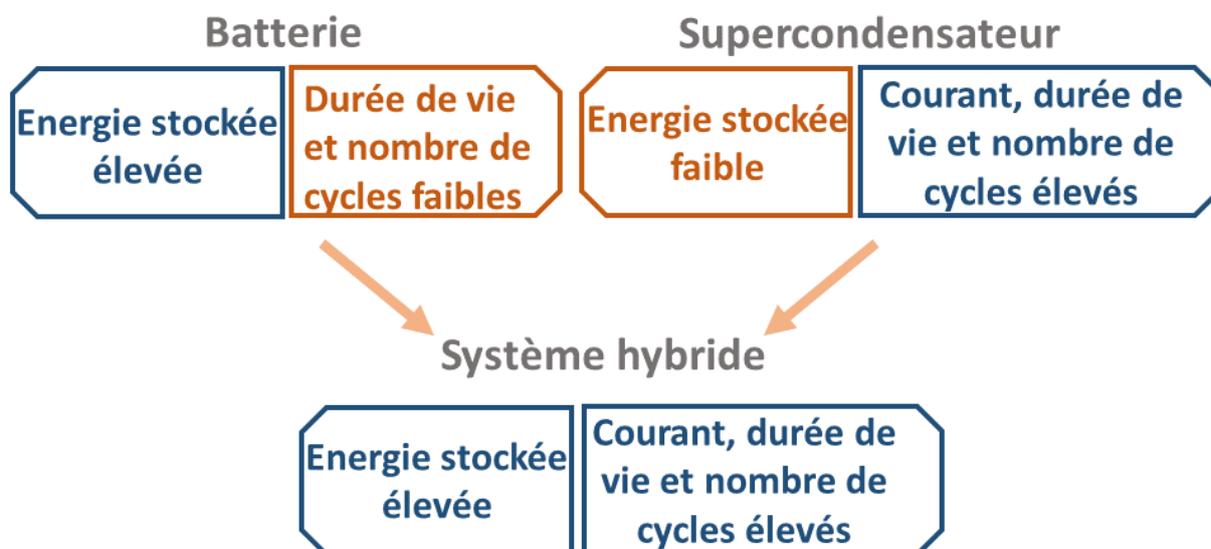


Figure 4.1: Couplage entre batterie et super-condensateur

Comme le montre la figure 4.1, ce choix a été effectué en prenant en compte les particularités techniques de ces deux types de stockages qui sont pleinement complémentaires. En effet, le stockage par batterie permet de grandes capacités mais elles possèdent une dynamique relativement faible comparativement aux super-condensateurs, qui eux possèdent les propriétés inverses à savoir une relativement faible capacité mais une

dynamique élevée. L'hybridation des batteries et des super-condensateurs permet de réunir les avantages des deux systèmes de stockage. Enfin dans une troisième partie, nous présenterons l'étude et la modélisation complète d'une source éolienne avec stockage couplée à un bus HVDC, correspondant aux objectifs fixés dans le cadre du travail réalisé dans cette thèse.

2. LA CONVERSION DC/DC -GENERALITES

Comme nous avons montré dans le chapitre précédent la conversion continu-continu est utilisée pour générer les tensions et les courants continus souhaités. Cette topologie est divisée en deux familles de convertisseurs, la conversion vers le haut avec des convertisseurs de type Boost, et la conversion vers le bas avec des convertisseurs de type Buck. Naturellement, il existe également des convertisseurs DC/DC hybrides permettant en fonction du niveau de la source et de la sortie désirée d'élever ou diminuer la tension. Il s'agit alors des convertisseurs de type Buck-Boost.

Les convertisseurs DC/DC sont caractérisés par un grand rendement car dans le cas idéal ces derniers ne consomment aucune énergie grâce à leurs constitutions avec uniquement des éléments réactifs de type selfs et capacités.

Dans notre chaîne de production d'électricité sur bus à courant continu généré par l'énergie éolienne, la tension de sortie de la génératrice GSAP (PMSG), c'est à dire en entrée du convertisseur, aura toujours une tension continue inférieure à la tension choisie du bus HVDC à savoir 600 VDC, c'est à dire en sortie du convertisseur. Le convertisseur DC/DC utilisé pour notre chaîne éolienne sera donc un convertisseur Boost.

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC correspond à celui d'une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue plus élevée, (mais de polarité inverse). Il existe de nombreuses architectures développées de convertisseurs et qui répondent, voire qui sont optimisées pour des paramètres de conversions DC/DC définis comme par exemple les niveaux de tension et courant en entrée et en sortie, donc les niveaux de puissance et taux de conversion, la stabilité et ondulations acceptables autour des niveaux de tension ou de courant définis, le rendement recherché, ... mais toutes ces architectures repose sur le même principe d'alimentation à découpage. Le

schéma de principe des convertisseurs Buck-Boost de base est représenté sur la figure 4.2 [3]

Le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost peut être expliqué selon l'état de l'interrupteur K ;

- Lorsque l'interrupteur K est fermé, l'énergie stockée dans la bobine va augmenter.
- Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'inductance se trouve alors reliée à la charge et à la capacité, l'énergie stockée dans l'inductance va être transférée vers la capacité et la charge.

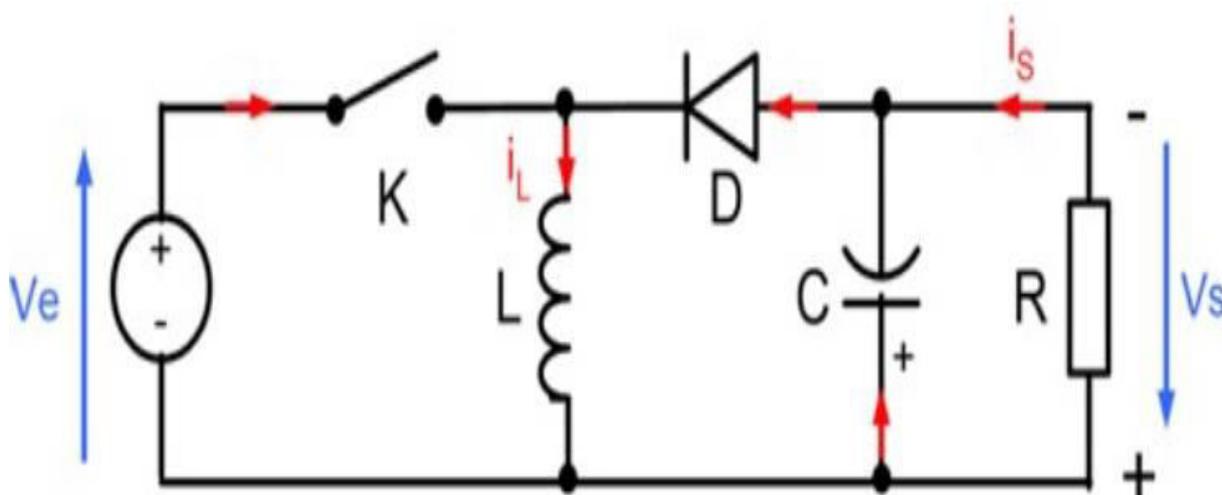


Figure 4.2: Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost

3. LA CONVERSION DC/DC POUR LA CHAÎNE ÉOLIENNE

Le convertisseur DC/DC utilisé pour notre chaîne éolienne est un Boost commandé par un Mosfet. Nous avons modélisé dans l'environnement Matlab/ Simulink la commande du Mosfet. Le schéma Matlab/Simulink est représenté sur la figure 4.3, page suivante.

La commande du Mosfet doit se faire de façon dynamique afin d'obtenir l'extraction du maximum de puissance dans la zone de production de l'éolienne. Pour cela, la commande doit effectuer en permanence le calcul de la différence entre la puissance nominale de l'éolienne et celle délivrée par le système à la sortie du redresseur AC/DC. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les indications de la puissance nominale sont fonction des paramètres propres de l'éolienne considérée. Elles proviennent des données

que l'on trouve dans la notice technique fournie par le constructeur pour un fonctionnement dans la plage nominale de l'éolienne. La puissance délivrée est, quant à elle directement mesurée en sortie du convertisseur.

Les réponses statique et dynamique du système à une variation de vent valideront notre choix de structure de commande. En sortie du circuit de commande du Boost, le signal généré est un signal en tout ou rien de type impulsionnel dont la dimension des impulsions permettra la commande du Mosfet. La zone nominale de production d'électricité de l'éolienne correspond à la zone dans laquelle l'éolienne fonctionne à son propre point de puissance maximum. Cette zone exclue les vents faibles et les vents au-delà d'une certaine limite. En effet, au-delà de cette limite, spécifique à chaque modèle d'éolienne, grâce à un système de frein ou de rotation des pales (angle pitch à zéro) l'éolienne décroche d'un fonctionnement normal lui permettant de se mettre en sécurité, voire à l'arrêt. Dans la zone nominale, entre ces deux limites, le rendement sera donc maximum.

Nous avons appliqué notre modèle à l'éolienne Anelion SW 3.5 GT étudiée dans ce travail. Les paramètres dans la figure 4.3 correspondent à cette éolienne. La puissance nominale servant de référence et d'optimum à atteindre est donnée par la valeur $P_{windref}$ calculé à partir des données du constructeur.

La puissance électrique délivrée par la génératrice de l'éolienne est calculée permettant d'avoir $P_{Boostin}$. La différence entre ces deux puissances par l'intermédiaire d'un régulateur PI indique la valeur du courant de référence à considérer I_{ref} à l'entrée du convertisseur Boost après être comparé au courant réellement délivré par la génératrice I_{dcin} .

Le différentiel résultant de cette comparaison permet, via un deuxième régulateur PI d'agir directement sur la tension en fonction des autres tensions en présence à savoir, en entrée la tension de sortie de la génératrice en sortie V_{dcin} et la réponse en tension réellement délivrée le Boost V_{dcout} . Le signal résultat de ces comparaisons est alors utilisé comme entrée d'un générateur d'impulsion variable que commandera le Mosfet du Boost.

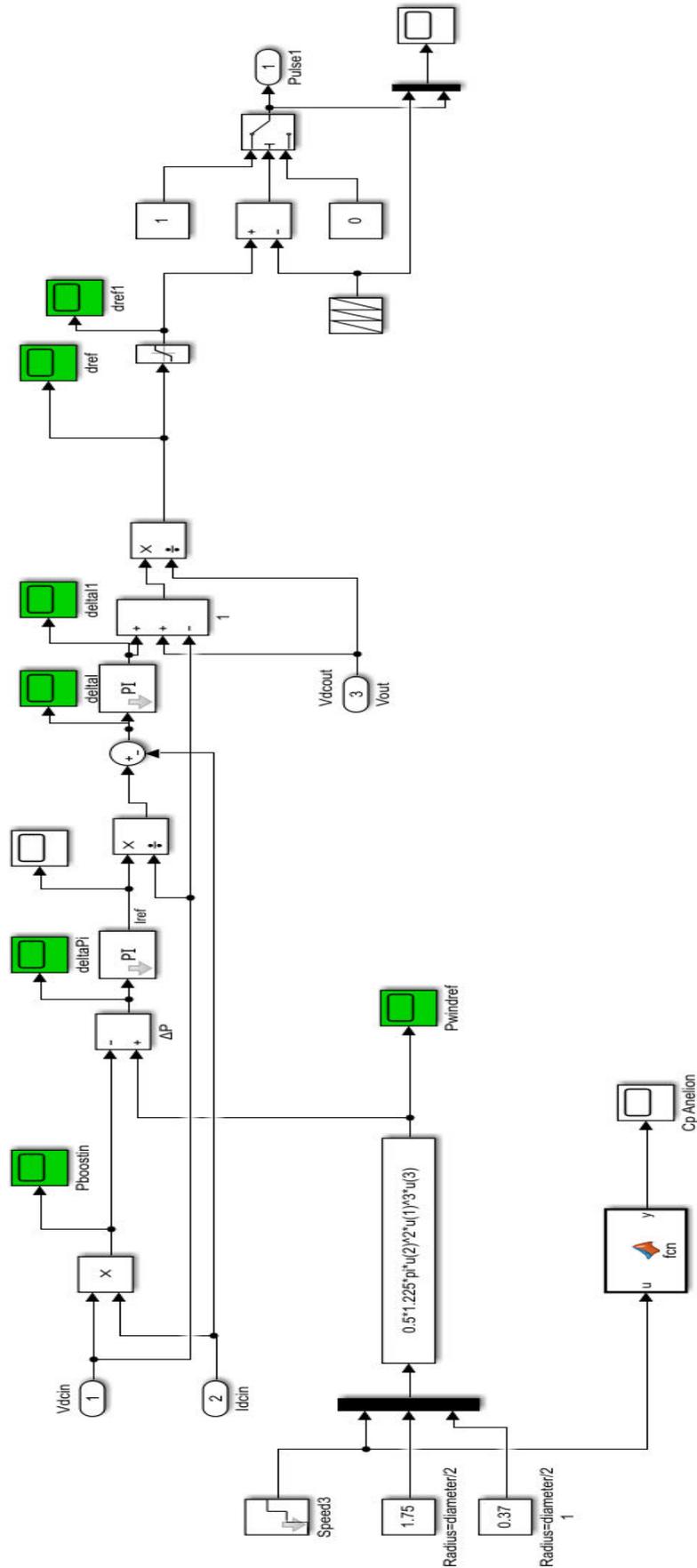


Figure 4.3: La commande du convertisseur Boost sous Matlab/Simulink

4. LE STOCKAGE D'ÉNERGIE-GENERALITES

Le stockage d'énergie joue un rôle flexible et multifonctionnel dans le réseau d'alimentation d'énergie électrique, en assurant un management plus efficace des ressources disponibles, En combinaison avec les systèmes de production d'énergie électrique par la conversion des énergies renouvelables. [4]

Le stockage d'énergie doit répondre à deux contraintes temporelles:

- **Un système de stockage à court terme** : utilisé principalement pour pouvoir assurer la régulation du réseau électrique, (temps de stockage inférieur à 10 min).
- **Un système de stockage à long terme** : utilisé principalement pour assurer une meilleure utilisation des centrales électriques (temps de stockage supérieur à 10 min).

L'autonomie d'un dispositif de stockage d'énergie électrique est essentiellement liée à sa puissance admissible (en W) et à son énergie disponible (en Wh). Le diagramme de Ragone (figure 4.4) est souvent utilisé pour comparer les particularités des différents éléments de stockage d'énergie [5].

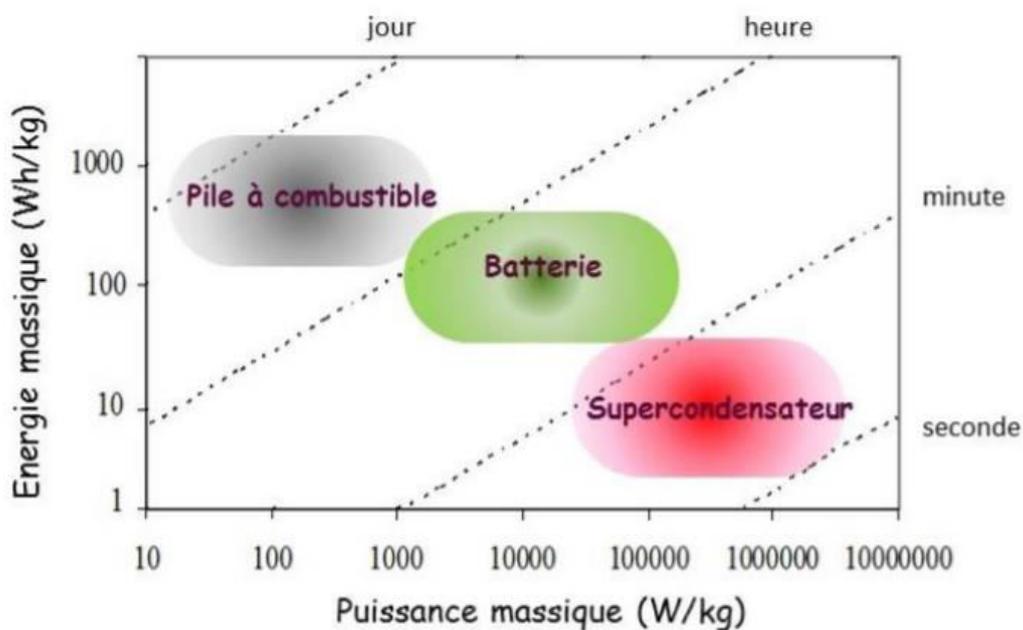


Figure 4.4: Diagramme de Ragone

D'après la figure 4.4 les piles à combustible ont une faible puissance massique mais « une énergie massique » assez importante. Les super-condensateurs possèdent une puissance massique importante mais une énergie massique plutôt faible. Les batteries se placent entre ces deux composants. [5]

4.1. TECHNIQUES DE STOCKAGE A LONG TERME

4.1.1. STOCKAGE D'ÉNERGIE SOUS FORME D'ÉNERGIE POTENTIELLE DE L'EAU

Nommé aussi stockage par pompage hydraulique, est une méthode utilisée depuis 1929, étant la plus vieille technologie de stockage d'énergie dans les centrales, En effet, jusqu'à 1970, c'était la seule option disponible sur le marché pour stocker de grandes quantités d'énergie, un tel système comporte deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, L'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur, ou elle est stockée, En fonction de la demande, l'eau peut revenir au réservoir inférieur, mais en traversant une ou plusieurs turbines hydrauliques transformant l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique , [6] ensuite des générateurs entraînés par les turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, De tels systèmes peuvent fournir jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le cout assez élevé de leur construction, Cependant, en France 4200 MW de stockage de ce type sont installés.

4.1.2. STOCKAGE D'ÉNERGIE SOUS FORME D'ÉNERGIE POTENTIELLE DE L'AIR COMPRIME

Le stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé (CAES, d'après le nom anglais : Compressed-Air Energy Storage) constitue une autre alternative, apparue un peu plus tard. Cette technologie de stockage comporte un grand réservoir souterrain, bien étanche, ou l'on peut stocker de l'air comprimé , En fonction de la demande, l'air comprimé est délivré à une turbine à gaz entraînant un générateur électrique, Ainsi l'énergie potentielle de l'air comprimé est transformée en énergie électrique, Le premier CAES commercial a été réalisé en Allemagne à Hundorf, en 1978, et peut fournir 290 MW , Comme pour le stockage hydraulique , La construction des CAES est conditionnée aux contraintes géographiques et géologiques, Toutefois, il y a déjà plusieurs CAES construits en

Europe et aux Etats-Unis, en utilisant d'anciennes mines de charbon ou de sel, de vieux puits de pétrole et des cavernes souterraines étanches.[7]

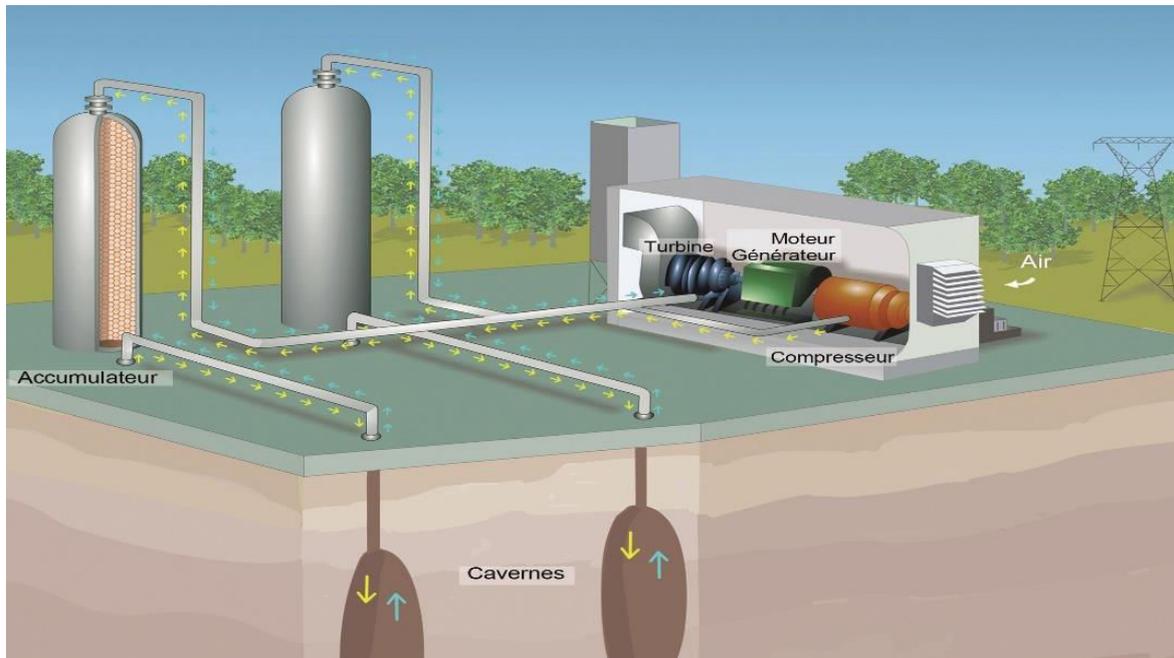


Figure 4.5: Stockage d'énergie par air comprimé

4.1.3. STOCKAGE D'ENERGIE SOUS FORME D'ENERGIE CHIMIQUE

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique, En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité, le premier et le plus utilisé sur le marché a été l'accumulateur au plomb dont plusieurs améliorations le rendent encore compétitif sur le marché, Etant disponibles sur une plage de puissance très étendue (quelques watts jusqu'aux modules de quelques MW), les batteries électrochimiques peuvent être utilisées dans une large variété d'applications, En 1994, un système d'accumulateurs chimiques capable de fournir 20 MW sur 40 minutes a été installé à Puerto Rico pour améliorer le contrôle de la fréquence et de la tension du réseau électrique[5] un autre exemple de grande taille constitué d'un accumulateur électrochimique pouvant fournir

40 MW sur 7 minutes (ou 27 MW durant 15 minutes), a été installé en Alaska en 2003 afin de soutenir le réseau électrique [8].

4.2. TECHNIQUES DE STOCKAGE A COURT TERME

4.2.1. STOCKAGE D'ENERGIE ELECTRIQUE DANS DES SUPER-CONDENSATEURS

C'est la seule technologie où l'on peut parler vraiment du stockage d'électricité, car stockant directement des charges électroniques. Les autres types de stockage utilisent tous des intermédiaires physiques pour le stockage de façon indirecte de l'électricité comme des éléments mécaniques, magnétiques, chimiques, solides ou gazeux. Cependant c'est une technique relativement nouvelle qui se trouve encore en phase de recherche, A présent, nous trouvons fréquemment des super-condensateurs dans les produits électroménagers, mais leurs puissances ne dépassent généralement pas les 7-10 W. Les recherches actuelles ont pour but l'obtention de super-condensateurs dont la puissance soit de l'ordre de dizaines ou même de centaines de KW, afin d'être utilisés dans des véhicules électriques.

4.2.2. STOCKAGE D'ENERGIE CINETIQUE DANS UNE MASSE TOURNANTE APPELEE VOLANT D'INERTIE

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISE) ont été redécouverts depuis quelques années. Un SISE comporte un volant d'inertie couplé à une machine électrique pouvant fonctionner dans deux régimes : moteur ou générateur, les SISEs ont des constantes de temps de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures, en fonction de leur conception.

Les SISEs ont trouvé une application spécifique dans le domaine d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, pour maintenir la fréquence et la tension du réseau dans les limites imposées par les règlements. En raison de leur dynamique élevée, de leur bon rendement et de leur longue période de vie, les SISEs sont bien adaptés pour stocker l'énergie pendant des périodes courtes, ce qui suffit pour améliorer la qualité d'énergie [9]

4.2.3. STOCKAGE D'ENERGIE MAGNETIQUE DANS LES BOBINAGES SUPRACONDUCTEURS (SMES)

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Ce stockage d'énergie magnétique supraconductrice est connu sous l'abréviation SMES signifiant Superconducting

Magnetic Energy Storage. Pour maintenir la bobine dans l’état supraconducteur, il faut l’introduire dans un cryostat rempli d’hélium liquide.

Ces systèmes ont l’avantage d’une dynamique et d’une cyclabilité très élevées, Cependant, les couts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de SMESs en fonction. Même si les recherches envisagent des SMESs de l’ordre de 10-100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW.

4.3. PRESENTATION RESUMEE DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE DE L’ENERGIE

Nous avons présenté dans les paragraphes précédents les principaux systèmes de stockage de l’électricité qui existent en ne décrivant que ceux ayant le plus grand intérêt actuel pour une utilisation dans le cadre de réseaux et de micro-réseaux de distribution de l’énergie intégrant des sources d’énergies renouvelables.

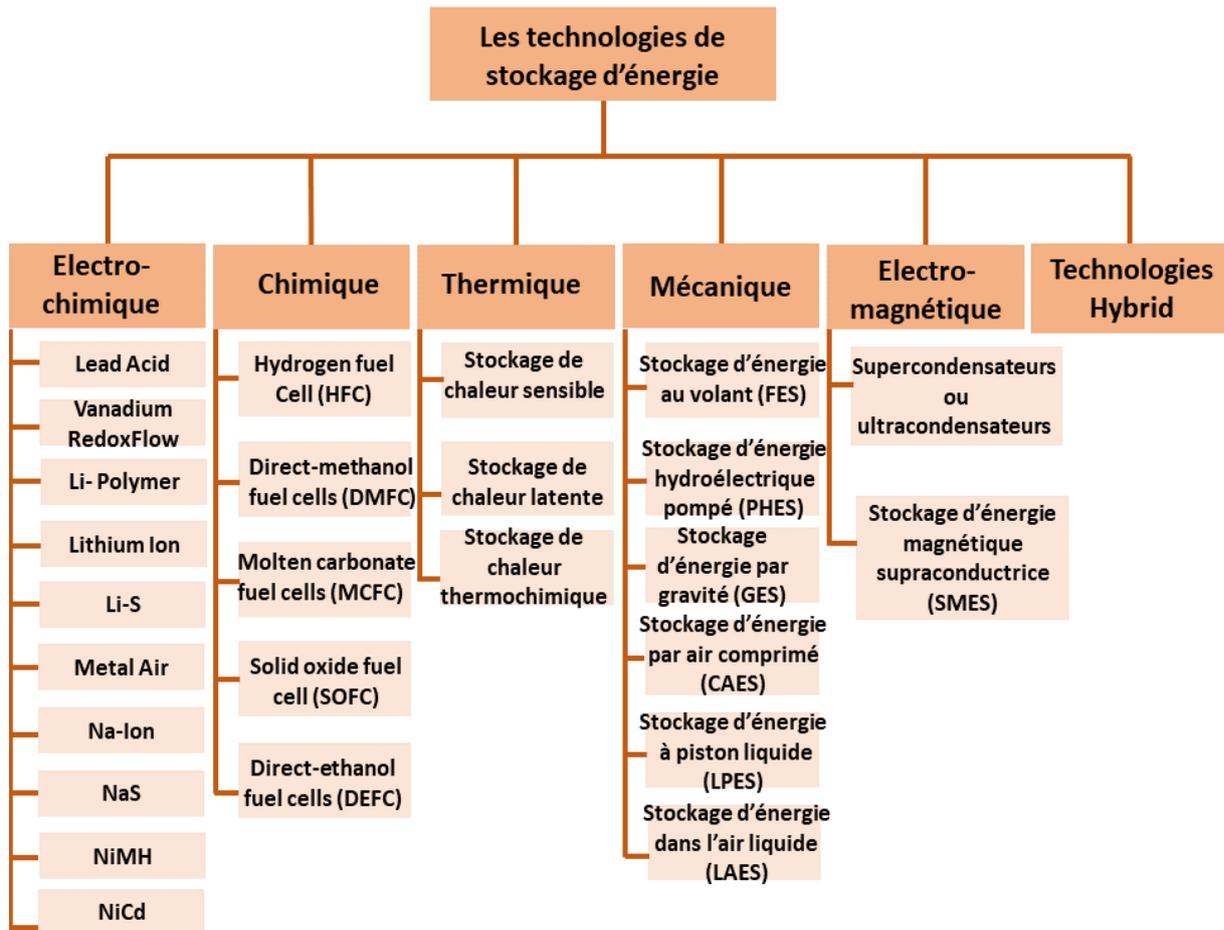


Figure 4.6: Différents Types de stockage d’énergie

Afin d'avoir une vue plus complète des systèmes de stockage existant, nous résumons dans la table de la Figure 4.6, de façon plus exhaustive, les différents systèmes de stockages de l'électricité existant [10].

Pour nos travaux de modélisation, avec comme objectif l'amélioration du rendement énergétique d'un système de conversion d'énergie éolienne connecté à un Bus HVDC nous avons choisi pour la partie du stockage une batterie au plomb (Lead Acid, technique électrochimique) et un super-condensateur (basée sur un stockage électronique de type capacitif rentrant dans la famille de technologies électro-magnétiques).

4.4. LA BATTERIE AU PLOMB

La plupart des utilisateurs de générateurs d'électricité en sites isolés à partir des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne, etc.) utilisent des batteries au plomb (lead-acide battery). C'est un ensemble d'accumulateurs au plomb-acide sulfurique raccordés en série pour avoir la tension désirée.

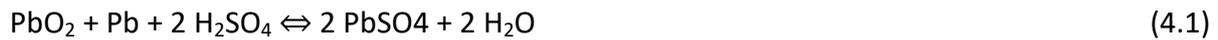
La batterie au plomb est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus couramment utilisée, en raison de son coût relativement faible et de sa large disponibilité. Comme mentionné précédemment, le principal inconvénient de ce type de stockage est la dynamique et la limitation relativement basse du nombre de cycle de recharge-décharge. Néanmoins, des batteries plomb spécifiques et optimisées pour le stockage de l'énergie provenant de sources renouvelables ont été développées pour répondre à l'intermittence des rechargements possibles. Les batteries Nickel-Cadmium, plus chères, sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale.

Dans les paragraphes suivants, je présente les principales connaissances nécessaires à la modélisation des batteries plomb pour notre étude.

4.4.1. PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DE LA BATTERIE AU PLOMB

Il est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner

naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire. [11]



La réaction présentée par l'équation 4.1, peut être décomposée en deux réactions partielles, simultanées, distinctes dans l'espace, dont l'une donne lieu à une capture et l'autre à une libération d'électrons, l'échange de ces électrons s'effectue alors par un courant extérieur et fournit de l'énergie électrique, comme indiqué dans les deux réactions des équations 4.2 et 4.3, telles que :

Au niveau de l'électrode positive :



Au niveau de l'électrode négative :



En principe l'électrolyte a une conductibilité électronique nulle (sous peine de court-circuiter les électrodes) et être dissocié en ions porteurs de charges électriques. Le passage du courant dans l'électrolyte est dû au déplacement des ions sous l'influence du champ électrique existant entre les électrodes. Durant la charge, l'acide est éliminé des plaques. Les pores en premier temps absorbent l'acide, ce qui entraîne une plus grande densité de l'acide interne aux pores à l'acide externe. Donc il va avoir un gradient de concentration de l'intérieur vers l'extérieur. Le chemin de la diffusion devient plus long, la conversion chimique déplace de plus en plus vers l'intérieur donc la densité de l'acide interne augmente ainsi que la tension de l'élément. Quand la tension de charge atteint 2,35–2,40V, il se produit en plus de la transformation (du sulfate de plomb en PbO_2 à l'électrode positive; une décomposition de l'eau sur l'électrode négative. La tension augmente jusqu'à une valeur

stable, la grandeur de cette valeur dépend du courant de charge, de la température, de la conception et de l'âge de l'élément. Des particules de la masse active sont arrachées par le fort dégagement gazeux de la dernière étape de charge. Des résidus s'accumulent dans la cellule. Le courant de charge ne doit pour cela en aucun cas être dépassé. L'effet principal durant la décharge réside dans la réduction du PbO_2 à l'électrode positive et l'oxydation du Pb à l'électrode négative. La sulfatation résulte de ces deux effets.

La densité est le paramètre le plus simple pour définir l'état de charge et de santé d'un élément. La densité de l'électrolyte dans un accumulateur au plomb-acide est fonction de la concentration d'acide sulfurique, de l'état de charge et de la température. En fin de décharge, la densité peut avoisiner 1,15. Arrivée à 1,10, la batterie n'est plus rechargeable. Le relevé de la densité, facile d'apparence, peut poser des problèmes. Au moment de la mesure, la température de l'électrolyte doit être relevée pour avoir des valeurs comparatives, les densités nominales étant annoncées pour une température de référence (la densité décroît lorsque la température monte).

Avant d'effectuer la mesure, il faut homogénéiser l'électrolyte soit par brassage mécanique (on envoie des bulles d'air par le bas de l'élément) soit en provoquant une surcharge (production massive de gaz). Ces conditions de relevés maîtrisées, il faut tenir compte de l'âge de la batterie car en vieillissant, une partie de l'acide absorbé par la sulfatation irréversible et l'oxydation des grilles, n'est plus restitué à l'électrolyte. Il s'ensuit une baisse de densité qui s'accroît au fur et à mesure que la batterie vieillit.[13]

4.4.2. EVALUATION DE L'ETAT DE LA BATTERIE

Pour évaluer une batterie au plomb, il est nécessaire de connaître ses caractéristiques essentielles telles que sa tension nominale U liée au nombre d'éléments n

$$U = n * 2.1 \text{ (si } n = 6 \rightarrow U = 12.6 \text{ V)} \quad (4.4a)$$

Et sa capacité de stockage C qui s'exprime en Ah l'énergie électrique correspondante est

$$E = C * U \quad (4.4b)$$

Exemple si : $C = 50 \text{ Ah}$ et $U = 12 \text{ V} \Rightarrow E = 600 \text{ Wh}$

Son courant maximal I ou courant de crête (en A). Il est à noter que la capacité d'une batterie est d'autant plus faible que sa rapidité de décharge est importante. Pratiquement, une batterie au plomb de 12V bien chargée a une tension à ses bornes supérieure à 12,6V, par contre si cette tension est inférieure à 10,8V=(1,8x6), la batterie est déchargée ou en mauvais état.

4.4.3. PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DE LA BATTERIE AU PLOMB

La modélisation consiste à traduire les phénomènes qui se produisent dans des systèmes physiques par une représentation souvent mathématique. La modélisation des sources électrochimiques est intéressante pour plusieurs raisons. En effet, un modèle complet de la batterie permet de prédire son comportement dans certaines conditions de fonctionnement, d'adapter le type de batterie à l'application pour une utilisation optimale de l'énergie, de comprendre les dégradations dues à des conditions particulières de fonctionnement, d'interpréter l'influence de certains paramètres ou profils de charge ou décharge sur les performances de la batterie. D'une manière générale la modélisation permet de réduire l'effort expérimental et de gagner en temps, En énergie et en investissement. Pour modéliser une batterie, selon les phénomènes à étudier, des modèles de fonctionnement ou des modèles de compréhension peuvent être privilégiés.

Plusieurs solutions sont offertes par la littérature, mais généralement elles sont basées sur des équations empiriques, et souvent difficiles à appliquer. La plupart des modèles proposés utilisent des grandeurs et des paramètres, dont les valeurs doivent être ajustées, particulièrement à chaque type de batterie, exigeant ainsi des expériences coûteuses avant de concevoir un système, ce qui gênerait l'utilisation répandue de ces modèles.

De ce fait, il serait plus adéquat de réaliser un équilibre entre la précision et la simplicité par l'utilisation d'un modèle généralement basé sur l'observation du phénomène physico-chimique de la charge et de la décharge du système de stockage. [14]. Ainsi, le modèle mathématique de l'équation 4.5 décrit mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge, tel que :

$$V = n. E \pm n. R. I \quad (4.5)$$

4.4.4. LA CHARGE DE LA BATTERIE

En journée ensoleillée, et dans le cas où la puissance de générateur PV et/ou l'éolien est plus grande que la charge, les régulateurs associés à la batterie rendent les batteries en état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par [15] :

$$C_{\text{Bat}}(t) = C_{\text{Bat}}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(P_{\text{éol}}(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{\text{inv}}} \right) \cdot \eta_{\text{Bat}} \quad (4.6)$$

Où $C_{\text{Bat}}(t)$ et $C_{\text{Bat}}(t-1)$ sont les quantités de la charge et de la décharge des batteries aux temps (t) et (t-1) respectivement, σ exprime le taux de charge spontané, $P_{\text{éol}}$ est la puissance de l'éolienne, P_L est la charge demandée à (t), η_{inv} et η_{Bat} sont respectivement les rendements de l'onduleur et de la batterie. Selon la référence [16] le rendement de la batterie pendant la charge est de 0.8 à .85, cependant il est égal à 1 pendant la décharge.

On définit l'état de charge de la batterie noté généralement SOC pour « state of Charge ». Il est égal à 1 pour une batterie chargée

4.4.5. LA DECHARGE DE LA BATTERIE

Dans le cas défavorable où la demande de la charge est plus grande que celle produite par les générateurs, la capacité des batteries est exprimée par l'équation 4.7 :

$$C_{\text{Bat}}(t) = C_{\text{Bat}}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(\frac{P_L(t)}{\eta_{\text{inv}}} - P_{\text{éol}}(t) \right) \quad (4.7)$$

La capacité de la batterie oscille entre des valeurs extrêmes telles que :

$$C_{\text{Bat min}} \leq C_{\text{Bat}} \leq C_{\text{Bat max}} \quad (4.8)$$

La capacité maximale est généralement dénommée capacité nominale ($C_{\text{Bat min}} = C_{\text{Bat nom}}$) alors que le minimum de capacité de la batterie est déterminé par le (DOD : Deep Of Charge) [16], [17] :

$$C_{\text{Bat min}} = \text{DOD} \cdot C_{\text{Bat nom}} \quad (4.9)$$

Nous avons vu que le SOC était égal à 1 pour une batterie chargée au maximum. Par contre le minimum de charge est déterminé par le maximum de profondeur de charge DOD.

La capacité de stockage est sujette à la demande de la charge électrique ainsi que de son autonomie. Il est à noter que la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si le DOD prend les valeurs de capacité de stockage de la batterie est de 30-50% [18].

4.4.6. TENSION DE LA BATTERIE

La tension aux bornes de la batterie est décrite par la relation qui la relie au courant et à l'état de la charge, et est représentée par la figure 4.6 [19]. Pour un nombre n de batteries mises en série on peut écrire l'équation 4.10 qui suit :

$$V_{\text{Bat}}(t) = n_b V_{\text{Co}} + n_b I_{\text{bat}}(t) \cdot R_{\text{bat}}(t) \quad (4.10)$$

Où $V_{\text{Bat}}(t)$ et $R_{\text{bat}}(t)$ sont, respectivement, la tension de circuit ouvert au temps t , et la résistance interne de la batterie. Cette tension est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge, comme présenté par l'équation suivante :

$$V_{\text{Co}}(t) = V_F + b \cdot \log(\text{SOC}(t)) \quad (4.11)$$

Où V_F et b sont la force électromotrice et une constante empirique, respectivement.

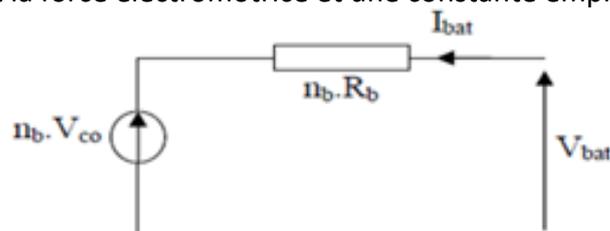


Figure 4.7: Schéma électrique d'une batterie

La résistance interne $R_{bat}(t)$ de la batterie varie en fonction des résistances de l'électrolyte et electrode, selon la relation suivante :

$$R_{bat}(t) = R_{électrode}(t) + R_{électrolyte}(t) \quad (4.12)$$

Ces deux résistances varient aussi en fonction du SOC selon la relation 4.13 :

$$R_{électrode}(t) = r_1 + r_2 \cdot (SOC(t)) \text{ et } R_{électrolyte}(t) = [r_3 - r_4 \cdot (SOC(t))] \quad (4.13)$$

Pour une batterie plomb-acide les paramètres b, r_1, r_2, r_3 et r_4 , constantes empiriques, et V_f sont regroupées dans le tableau suivant : [20]

Paramètres	Mode de charge	Mode de décharge
Vf	13.250 V	12.662 v
B	0.810	0.724
r1	0.062 ohms	0.055ohms
r2	0.046 ohms	0.010 ohms
r3	95.638 ohms-1	4.270 ohms-1
r4	52.671ohms-1	-100.730 ohms-1

Tableau 1.4 Caractéristique d'une batterie Plomb-Acide

4.4.7. COURANT DE BATTERIE

Le courant de charge des batteries au temps t , au moment où la production d'un ou des deux générateurs renouvelables est supérieure à la charge, est exprimé par la relation suivante :

$$I_{Bat} = \frac{P_{éol}(t)}{V_{Bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} \quad (4.14)$$

Par contre quand la puissance d'un ou des deux générateurs ne peut satisfaire la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est exprimé comme suit :

$$I_{\text{Bat}} = \frac{E_L(t)/\eta_{\text{inv}}}{V_{\text{Bat}}(t)} - \frac{P_{\text{éol}}(t)}{V_{\text{Bat}}(t)} \quad (4.15)$$

4.4.8. RENDEMENT DE LA BATTERIE

Pratiquement, le rendement de la batterie est considéré constant égal à la valeur de 85%, la tension nominale est de 12V avec la capacité de 100Ah, il est obtenu par la relation suivante :

$$\eta_{\text{bat}} = \frac{P_{\text{fournie}}}{P_{\text{incidente}}} \quad (4.16)$$

Avec $P_{\text{incidente}}$, la puissance fournie par les générateurs.

4.5. LES SUPER-CONDENSATEURS

Le principe de la double couche électrique est découvert par le physicien Hermann von Helmholtz dans l'année 1853. Il remarque que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement des ions de cet électrolyte à la surface de cette interface.

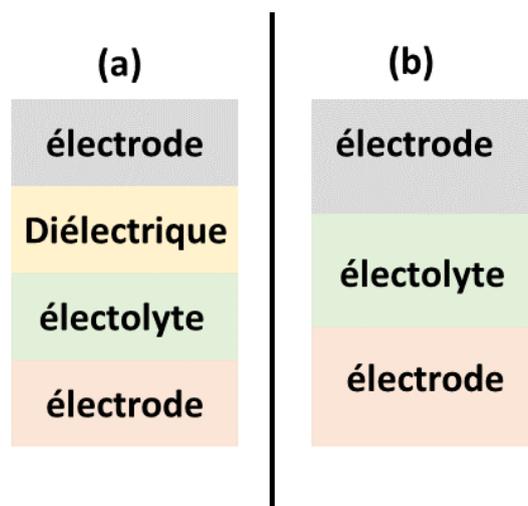


Figure 4.8: Différence entre un condensateur classique (a) et un super-condensateur (b)

Pour des raisons technologiques, il a fallu attendre 100 ans pour que les condensateurs à double couche électrique voient le jour, soit vers la fin des années 1950. L'idée était alors de renouveler les systèmes de stockage d'énergie. Les industriels et les scientifiques, par les progrès qu'ils apportent aux matériaux des électrodes et de l'électrolyte depuis ces 30 dernières années, ont permis de créer le super-condensateur s'imposant aujourd'hui de plus en plus dans les systèmes de forte puissance. [21] Un super-condensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide figure 4.7.

Dans ces composants, l'énergie emmagasinée est liée à la valeur de la capacité C et de la tension imposée à ses bornes :

$$\begin{cases} E = 0.5CV^2 \\ \text{ou } C = \varepsilon_0\varepsilon_r S/D \end{cases} \quad (4.17)$$

avec ε_0 : la permittivité du vide, ε_r : la permittivité relative du diélectrique, S : surface de l'électrode et D : épaisseur diélectrique.

Lorsque l'on veut accroître la capacité de stockage, il faut augmenter la permittivité relative ou accroître la valeur du rapport (S/D). Le principe général de fonctionnement des super-condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte [22], [23], [24]. L'épaisseur d est très faible car la fonction diélectrique est assurée par les molécules du solvant de l'électrolyte. La surface de l'électrode est très grande grâce à l'utilisation de matériaux microporeux. De plus, le condensateur classique ne développe qu'une capacité (à l'anode) alors que les deux électrodes du super-condensateur portent des charges et que le dispositif se comporte comme deux capacités en série séparées par une résistance correspondant à la résistance de l'électrolyte.

4.5.1. ELEMENTS CONSTITUTIFS DES SUPER-CONDENSATEURS

La construction des super-condensateurs utilisant le principe de double couche intègre une membrane isolante poreuse, donc conductrice ionique, séparant les deux électrodes imprégnées d'électrolyte. On utilise un polymère ou du papier en milieu organique, une céramique ou de la fibre de verre en milieu aqueux. Le séparateur introduit un terme supplémentaire dans la résistance totale du composant, terme dépendant de la porosité et de l'épaisseur de la membrane.

Il y a trois grandes catégories de matériaux d'électrodes : les charbons actifs, les matériaux métalliques et les polymères conducteurs électroniques. Pour l'électrolyte, on a deux types d'électrolyte :

- Les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse ;
- Les électrolytes organiques, tel que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile ;

Le qualificatif de super-condensateurs n'est pas réservé à des composants de nature entièrement électrostatiques et pour lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. On utilise aussi ce terme pour qualifier des composants où interviennent des processus faradiques réversibles [24], [25].

4.5.2. DIFFERENTS TYPES DE SUPER-CONDENSATEURS

Il existe plusieurs types de super-condensateurs qui se différencient par leur mode de fonctionnement :

- Les super-condensateurs pseudo-capacitifs ;
- Les super-condensateurs à double couche électrochimique ;
- Les super-condensateurs hybrides ;
- Super-condensateurs à stockage d'énergie électrostatique ;

4.5.3. SUPER-CONDENSATEURS PSEUDO-CAPACITIFS

Ce type de super-condensateurs met en jeu des réactions faradiques de surface. Il existe ainsi deux types principaux de super-condensateurs pseudo-capacitifs : les super-

condensateurs à base d'oxydes métalliques et ceux à base de polymères conducteurs. Dans les super-condensateurs à base d'oxydes métalliques, la capacité est due à des réactions redox à la surface et dans le volume du matériau d'électrode. Elle est dépendante de la quantité de charges transférées, elle-même dépendante de la tension appliquée. Les oxydes des métaux de transition possèdent un grand nombre d'états d'oxydation. Ils peuvent être préparés avec une grande surface spécifique et certains sont conducteurs. Les oxydes métalliques sont donc de bons matériaux pour développer les super-condensateurs.

Dans les super-condensateurs à base de polymères conducteurs, le polymère peut recevoir un excès d'électrons par réduction ou donner des électrons par oxydation. Les polymères sont conducteurs car l'excès de charges peut être délocalisé sur la chaîne du polymère en raison de l'alternance de liaisons simple et multiple. Ce phénomène est réversible, les polymères conducteurs électroniques peuvent stocker des charges et les restituer c'est pourquoi ils sont intéressants pour la réalisation de super-condensateur.

4.5.4. SUPER-CONDENSATEURS HYBRIDES

Ces super-condensateurs sont composés de deux électrodes dissymétriques : une électrode est de type capacitif et l'autre de type pseudo-capacitif ou batterie. Ces super-condensateurs essaient de tirer parti de chaque type de composant. L'électrode pseudocapacitive permet d'obtenir une grande densité d'énergie, l'électrode capacitive permet d'obtenir une grande densité de puissance.

4.5.5. SUPER-CONDENSATEURS A STOCKAGE D'ENERGIE ELECTROSTATIQUE

Actuellement, la technologie la plus répandue est celle au charbon actif, dont les surfaces spécifiques dépassent $1000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, et atteignent $3000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ [26], [27]. Ces super-condensateurs fonctionnent selon un principe du type électrostatique : l'électricité est stockée par accumulation d'ions dans la couche double électrique existant à l'interface électrode-électrolyte. L'absence de véritables réactions chimiques permet une excellente réversibilité, et donc une durée de vie, théoriquement infinie, de plus de 100 000 cycles en pratique. Citons deux autres particularités de ces super-condensateurs.

Le stockage d'énergie principalement électrostatique leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée, typiquement d'un seul ordre de grandeur inférieure à

celle des condensateurs électrolytiques, - le faible coût des procédés de fabrication et surtout de la matière première. Le charbon actif est obtenu par calcination et activation de matières hydrocarbonées comme le bois de pin. Il existe deux types d'activation : physique ou chimique. Dans le premier cas, les produits végétaux sont broyés, concassés et carbonisés à 600 °C. L'activation est réalisée par un mélange de vapeur d'eau et de gaz carbonique CO₂. Le charbon obtenu est relativement exempt d'impuretés et présente une porosité peu distribuée. Dans le second cas, une sciure de bois de pin est imprégnée avec de l'acide orthosyphathique et puis chauffée à haute température. Ces charbons ont une distribution de porosité importante.[28]

4.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES SUPER-CONDENSATEURS ET BATTERIES

Par rapport aux batteries, les super-condensateurs présentent les avantages et inconvénients suivants [29] :

4.6.1. AVANTAGES DES SUPER-CONDENSATEURS PAR RAPPORT AUX BATTERIES

- Durée de vie pratiquement illimitée : la durée de vie des super-condensateurs est considérée 1000 fois plus importante que celle des batteries.
- Densité de puissance élevée : correspondant à plusieurs fois celles des batteries.
- Dynamique rapide : les super-condensateurs peuvent supporter en charge ou en décharge des variations rapides de régime de fonctionnement.
- Faible résistance série : grâce à cette propriété, les pertes pendant la charge et la décharge sont plus faibles que pour les batteries.

4.6.2. INCONVENIENTS DES SUPER-CONDENSATEURS PAR RAPPORT AUX BATTERIES

- Nécessité d'un équilibrage de tension : cet équilibrage de tension est exigé si plus de trois super-condensateurs sont reliés en série.
- Composants basses tensions : des mises en série sont nécessaires pour obtenir des tensions plus élevées que les quelques volts d'une cellule élémentaires.
- Faible densité d'énergie : la densité d'énergie est plus faible que les batteries (10 % à 20 % de celle d'une batterie).

- Prix : le prix des super-condensateurs est plus élevé que celui des batteries.

5. LE STOCKAGE D'ENERGIE POUR LA CHAINE EOLIENNE

Le stockage utilisé pour notre chaîne éolienne est ainsi basé sur une partie sauvegarde par batteries et une sauvegarde par super-condensateurs. Ce choix a été justifié dans les paragraphes précédents. Le dimensionnement de ces deux systèmes de sauvegardes a été fait en fonction des conditions de fonctionnement de l'éolienne et des tensions que la génératrice GSAP (PMSG) peut fournir au bus HVDC en sortie de la chaîne éolienne. Le dimensionnement a alors considéré la tension de sortie de la génératrice éolienne dans la plage de vent qui permet lui permet de fonctionner à son point de puissance maximum. Cette plage s'étend de 3.5 m/s à 14 m/s ce qui produira une puissance électrique sous une tension crête de 100 V à 380 V en sortie de la génératrice.

On rappelle qu'au delà de cette plage de vent, l'éolienne fonctionne en mode dégradé n'atteignant pas le point de puissance maximum correspondant à la vitesse de rotation car soit, ne tournant pas assez vite (en deçà de 3.5 m/s) soit pour des grandes vitesses de vent, en étant débrayée de la génératrice par un frein mécanique afin de ne pas l'endommager. Par phase nous aurons donc de disponible, une tension efficace d'environ 70 V à 370 V. Nous avons considéré pour le dimensionnement de la partie stockage une tension de 200 V que doit pouvoir délivrer le banc de batteries mises en série et le super-condensateur. Ce choix a été fait car cette tension en sortie de la génératrice correspond à une vitesse de vent d'environ 12 m/s considérée comme vitesse de fonctionnement optimale de l'éolienne.

Pour approcher expérimentalement ce niveau de tension d'environ 200 V, nous mis en série 16 batteries de 12V et choisi un super-condensateur de 70 F – 200 V.

5.1. PRINCIPE GENERAUX DE LA MODELISATION DU STOCKAGE

Dans les paragraphes suivants, nous présentons les modèles développés dans l'environnement Matlab/Simulink pour le stockage par batterie, puis pour le stockage par super-condensateur. Dans chaque partie on retrouvera spécifiquement l'élément de stockage, à savoir les batteries et le super-condensateur, et également les convertisseurs Buck et Boost assurant la charge et l'alimentation du bus. Nous présenterons ensuite les

commandes de ces convertisseurs que nous avons développés de façon identique mais dont les niveaux de déclenchement pour les cycles charge-alimentation ont été choisis de façon complémentaire.

5.2. MODELISATION DU STOCKAGE PAR BATTERIES

Nous représentons dans la figure 4.9 le schéma bloc du modèle complet de la partie stockage par batteries.

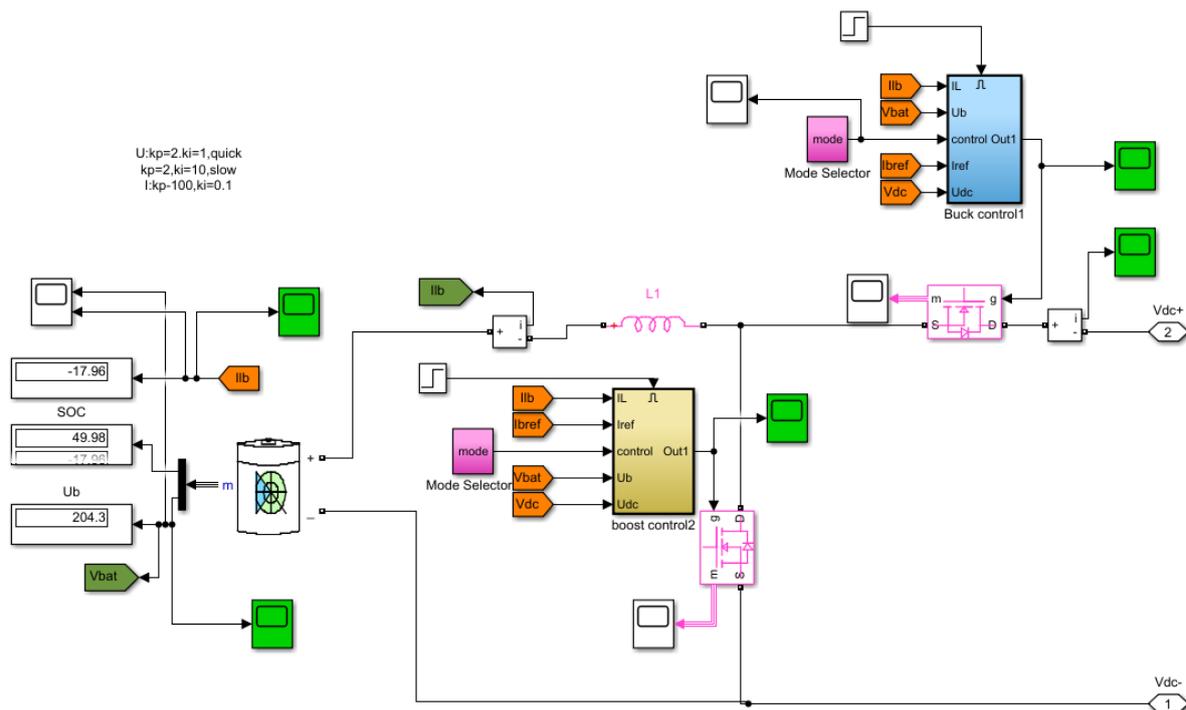


Figure 4.9: Schéma bloc Matlab/Simulink du modèle de stockage par batteries.

On retrouve dans la figure 4.9 les batteries, le Boost et sa commande et le Buck et sa commande. Les commandes seront détaillées dans un prochain paragraphe. Dans ce modèle, les convertisseurs sont des convertisseurs Boost et Buck de base. Ils sont dimensionnés en fonction des paramètres courant-tension choisis de façon à être compatibles avec ceux de l'éolienne et des caractéristiques du bus HVDC.

5.3. MODELISATION DU STOCKAGE PAR SUPER-CONDENSATEUR

Nous représentons dans la figure 4.10 le schéma bloc du modèle complet de la partie stockage par super-condensateur.

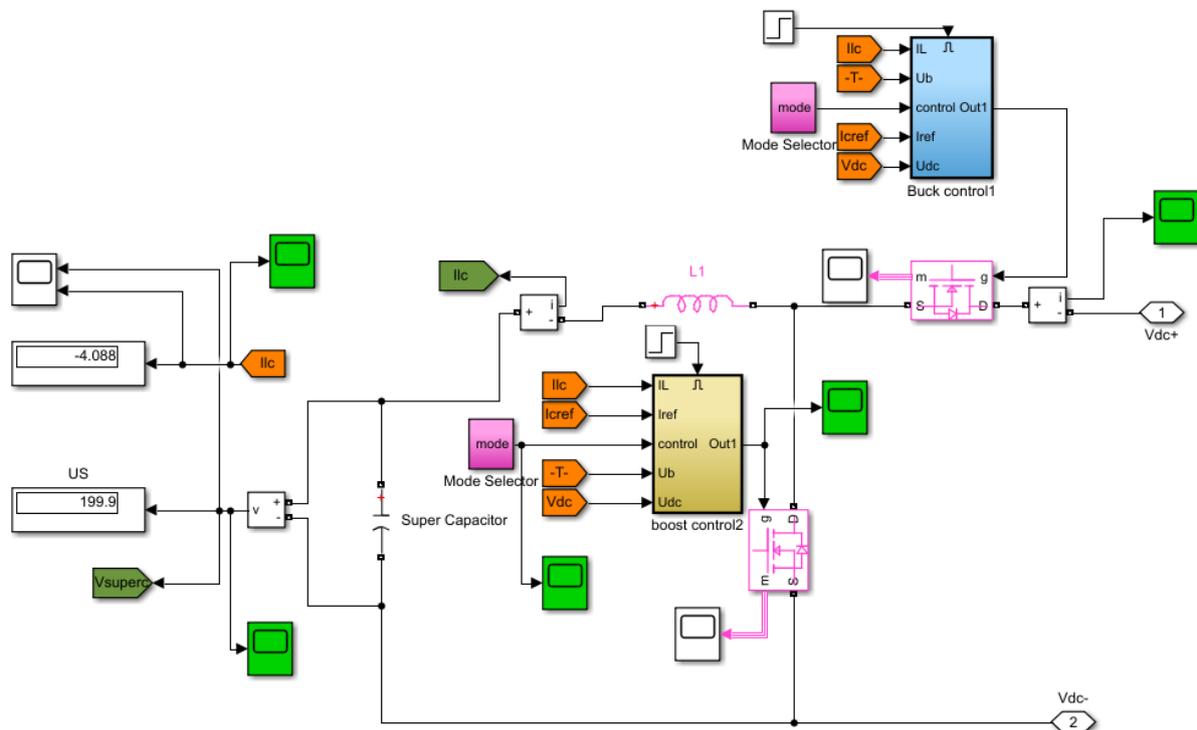


Figure 4.10: Schéma bloc Matlab/Simulink du modèle de stockage par super-condensateur.

Nous voyons clairement dans le schéma bloc de la figure 4.10 que les choix que nous avons fait ont permis de considérer le même type de modèle pour les deux systèmes de stockage. Cette topologie est un résultat important car c'est une représentation simplificatrice mais complète d'un modèle de générateur d'énergie d'origine renouvelable intégrant un système de stockage hybride.

5.4. MODELISATION DE LA PARTIE CONTROLE DES CONVERTISSEURS DE LA PARTIE STOCKAGE

Comme mentionné ci-dessus, § 3, la partie contrôle des convertisseurs de la partie stockage est identique pour les batteries et le super-condensateur et seuls les seuils de déclenchements sont différents. En effet, il est important de s'assurer que les batteries n'atteignent pas des valeurs minimum de stockage afin qu'elles soient protégées contre un endommagement potentiel. Dans les figures 4.11 et 4.12, nous représentons les modèles

Matlab/Simulink utilisés pour les contrôles des convertisseurs Boost et Buck, respectivement. Ces blocs sont appelés Boost control et Buck control dans la figure 4.10.

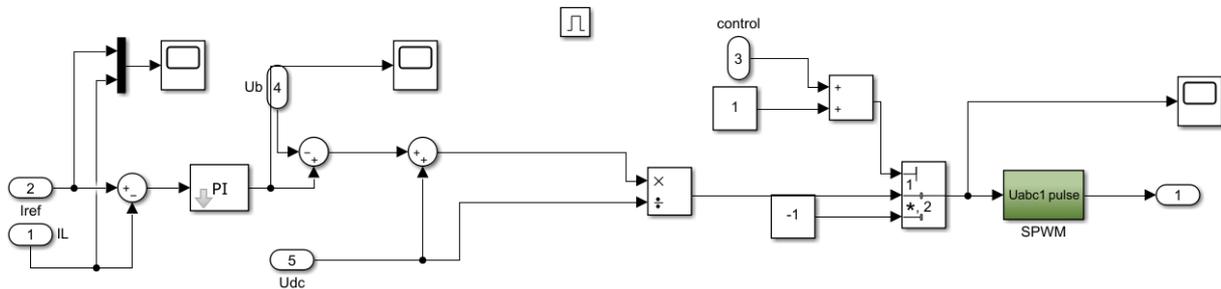


Figure 4.11: Schéma bloc Matlab/Simulink du contrôle du convertisseur Boost de stockage.

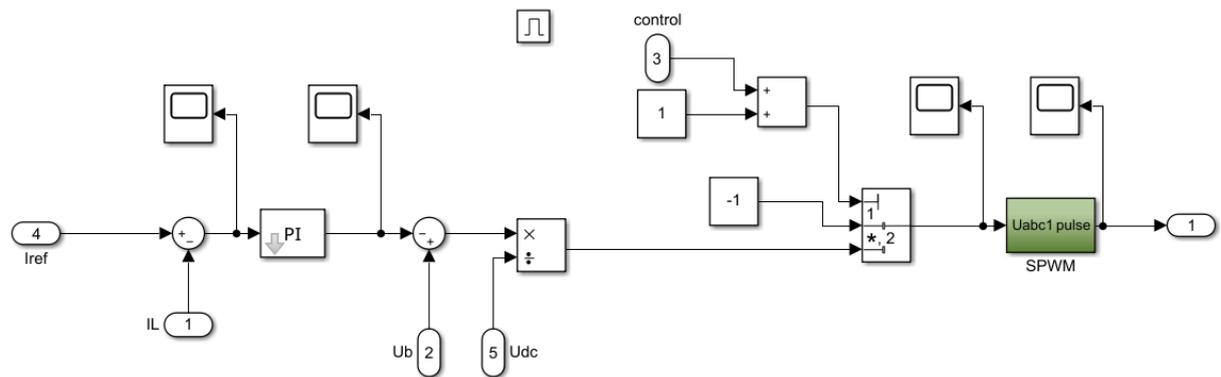


Figure 4.12: Schéma bloc Matlab/Simulink du contrôle du convertisseur Buck de stockage.

La commande des deux convertisseurs est assurée par un comparateur représenté par son schéma bloc de la figure 4.13. La sortie de ce comparateur correspond à l'entrée « control » des schémas des figures 4.11 et 4.12.

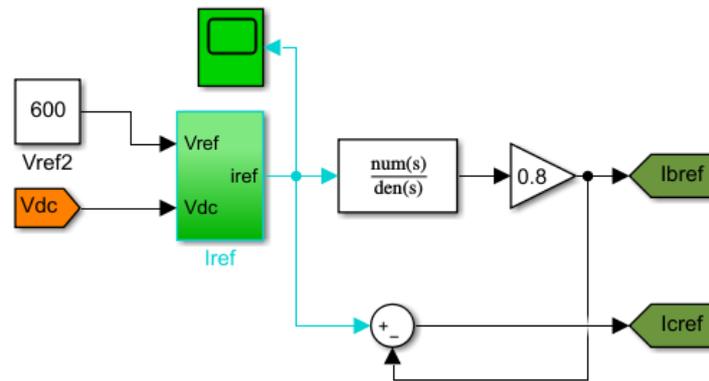


Figure 4.13: Schéma bloc Matlab/Simulink de la commande du contrôle des convertisseurs

Comme le montre la Figure 4.13, nous voyons qu'il a été choisi que le courant de référence est utilisé à hauteur de 80% pour définir le courant des batteries et à 20% pour celui du super-condensateur. Cela assure, malgré une mise en parallèle, des deux systèmes de stockage avec une priorité au stockage par batteries permettant ainsi l'assurance d'avoir une plus grande capacité d'énergie stockée rapidement.

La validation des modèles de la partie stockage de notre étude a été réalisée de façon individualisée. Bien naturellement, le paramètre d'entrée de notre système qui est la source d'énergie éolienne n'apparaît pas dans cette modélisation. Par contre, les paramètres d'entrée et de sortie de la partie stockage sont les paramètres du bus HVDC au quel sont reliés, également l'étage de production d'énergie éolienne et la charge. Pour cette raison, nous validerons le modèle de fonctionnement de la partie stockage dans le paragraphe suivant présentant le système de conversion de l'énergie éolienne avec stockage connecté au bus HVDC.

6. LE SYSTÈME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE AVEC STOCKAGE CONNECTÉ AU BUS HVDC

6.1. MODÈLE MATLAB/SIMULINK DU SYSTÈME COMPLET EOLIEN + STOCKAGE

Nous avons réuni dans l'environnement Matlab/Simulink les différents modèles optimisés que nous avons développés lors de cette étude. La figure 4.14, page suivante présente le schéma bloc de cette modélisation complète du système de conversion de l'énergie éolienne avec stockage connecté au bus HVDC.

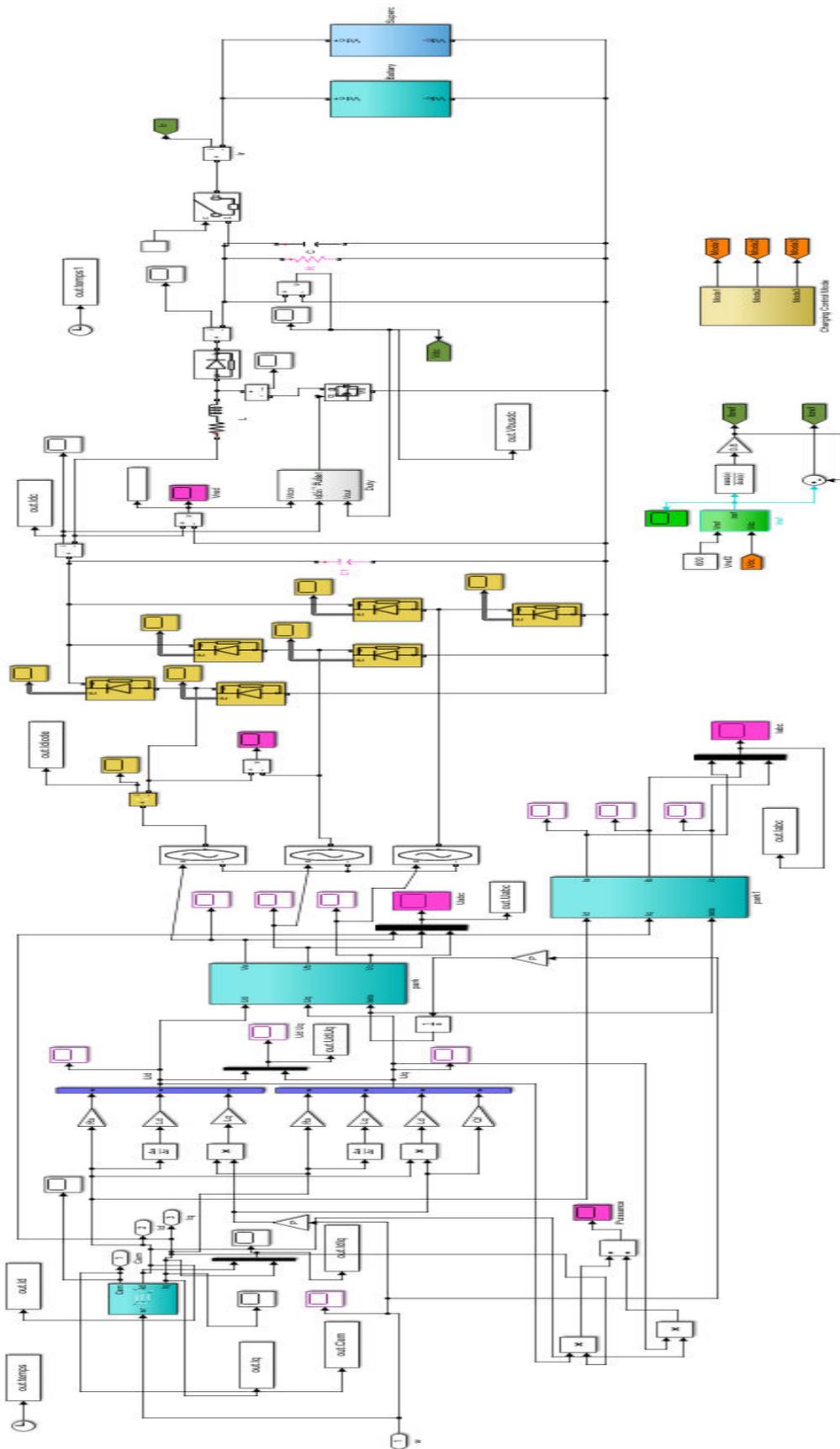


Figure 4.14: Schéma bloc du système complet éolien + stockages connectés au bus HVDC

Ainsi, on retrouvera dans cette figure : 1- la chaîne éolienne comprenant la turbine, la génératrice GSAP–PMSG, le convertisseur-redresseur AC/DC, le convertisseur DC/HVDC, 2- la partie stockage avec les batteries plomb et le super-condensateur.

Tous les blocs de ce schéma ont été présentés dans les chapitres et paragraphes précédents.

La tension du bus est fixée constante à une valeur de 600 VDC. Cette valeur de tension est assurée par le stockage.

La validation des modèles développés à été réalisée en différentes étapes considérant en entrée, différents profils de vents, à savoir :

- Un profil de vent possédant une vitesse constante fixée à 12 m/s
- Un profil de vent monotone croissant de façon discrète
- Un profil de vent non-monotone variant de façon discrète
- Un profil de vent monotone variable de façon continue et aléatoire.

6.2. REPONSE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE DE VENT FIXEE A 12 M/S. ETUDE STATIQUE.

Dans les figures 4.15 à 4.18, nous présentons les résultats de simulation du systèmes pour une vitesse de vent constante de 12m/s. Cette étude permet de valider les modèles dans une première phase de la simulation.

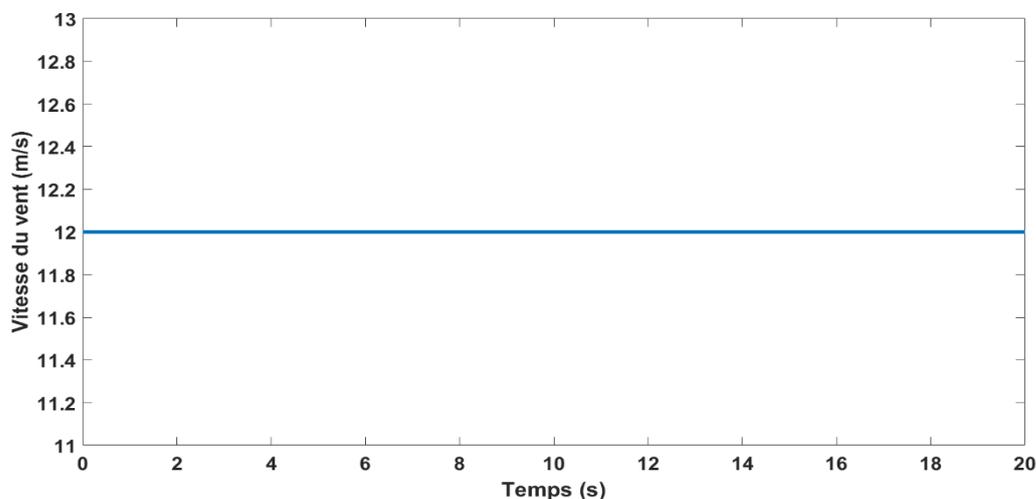


Figure 4.15: Profil du vent utilisé pour l'étude statique

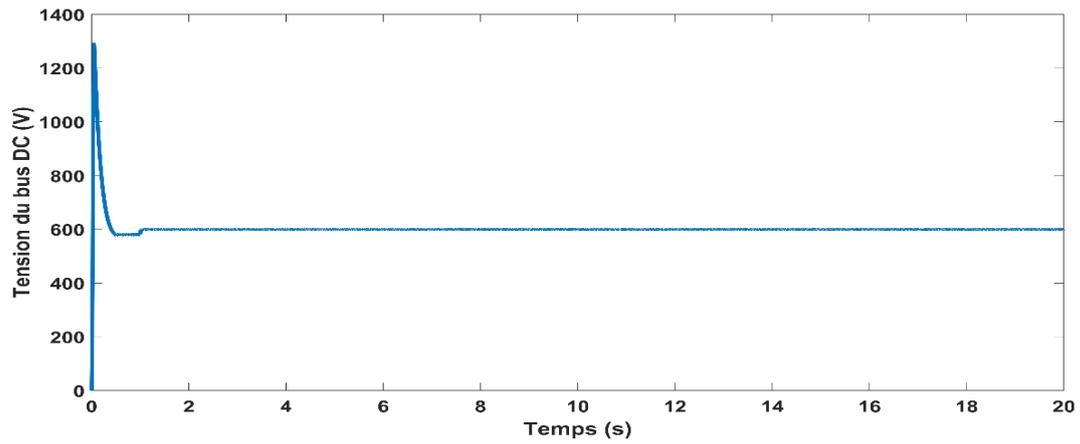


Figure 4.16: Tension du bus HVDC pour une vitesse fixe de 12 m/s

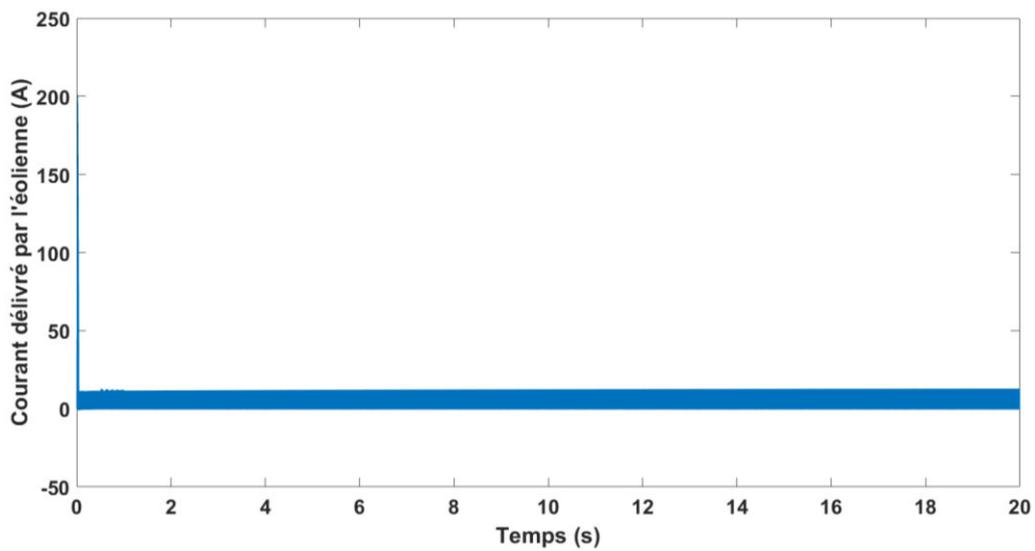


Figure 4.17: Courant délivré par l'éolienne pour une vitesse fixe de 12m/s

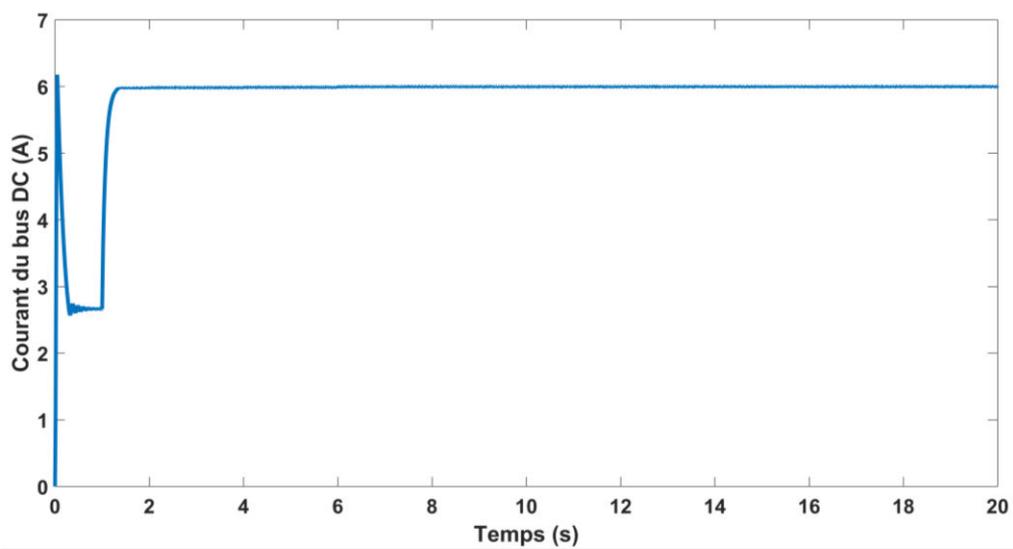


Figure 4.18: Courant du bus DC pour une vitesse fixe de 12m/s

Les figures 4.16 et 4.17 et 4.18 montrent clairement que lorsque l'éolienne est soumise à un vent ayant une vitesse constante, dans la plage de régulation considérée, les valeurs de la tension et du courant du bus HVDC auquel est connecté une charge fixe reste stable dans le temps et sont aux valeurs recherchées dans la modélisation. Cette valeur de courant du bus est ici de 6 A pour une tension stable au niveau également attendu de 600V.

Dans cette étude de la réponse statique du modèle du système complet, nous représentons maintenant les grandeurs électriques, tension et courant de la partie stockage. Ceci est présenté dans les figures 4.19 et 4.20 pour les batteries et dans les figures 4.21 et 4.22 pour le super-condensateur.

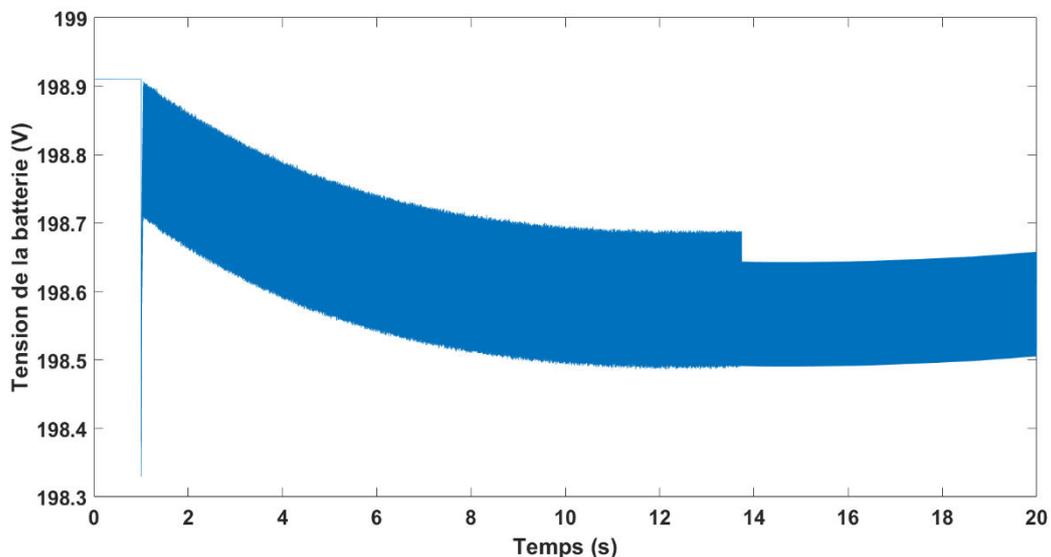


Figure 4.19: Zoom de la tension de la batterie au plomb.

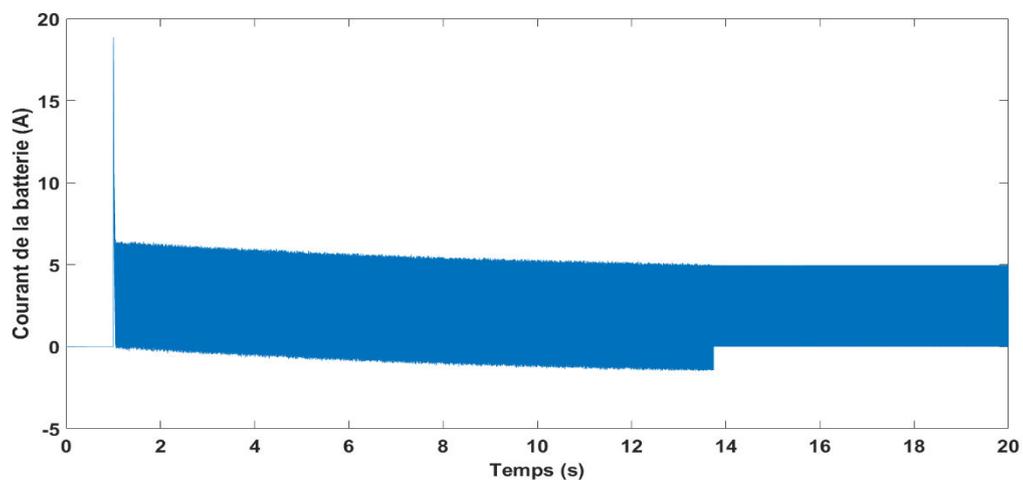


Figure 4.20: Courant de la batterie au plomb.

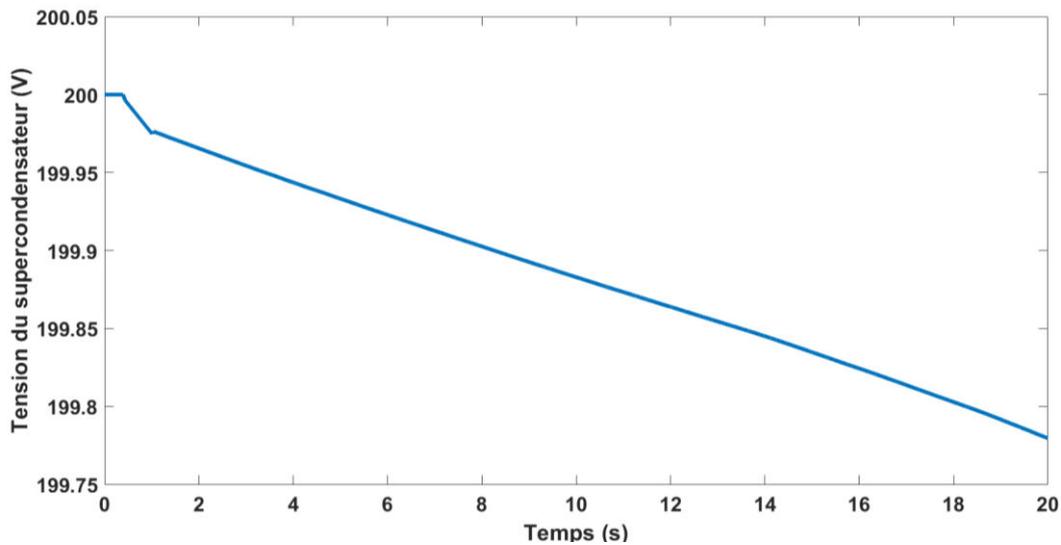


Figure 4.21: Zoom sur la tension du super-condensateur

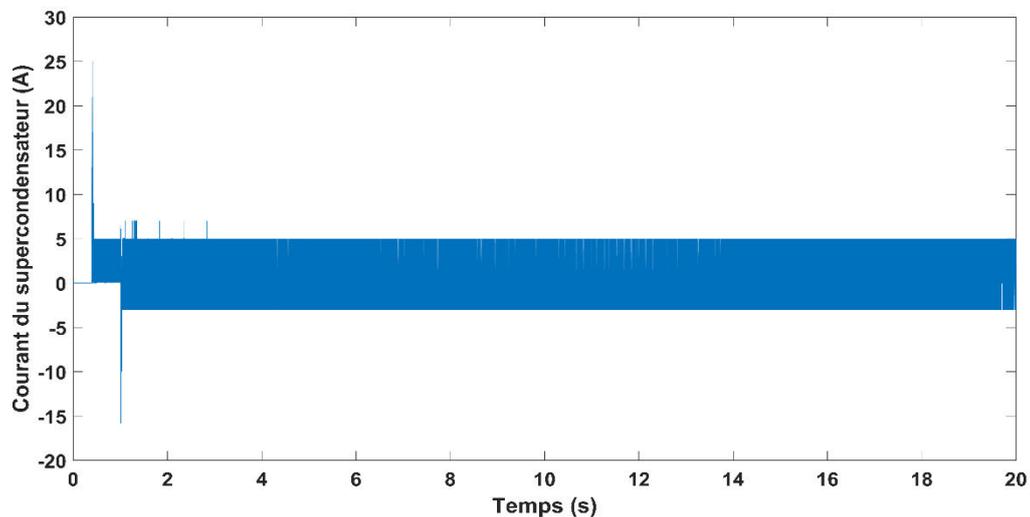


Figure 4.22: Le courant du super-condensateur

Il est à noter les échelles que nous avons choisies pour ces représentations.

En effet, afin de mettre en évidence les variations aux bornes du super-condensateur et de la batterie, nous avons effectué un zoom sur les tensions réglées à la valeur choisie comme tensions de sorties, en entrée des Boosts intégrés à la partie stockage. Cette tension correspond à une tension de 200Vdc pour la tension de sortie du super-condensateur et pour celle de la batterie.

Les figures 4.19 à 4.22 montrent les tensions et courants des batteries et du super-condensateur. Nous voyons très nettement la contribution de chacun des éléments de stockage à la fourniture d'énergie sur le bus. Il est néanmoins important de noter que la

variation de la tension en sortie du stockage est très faible. Elle correspond à environ 2% pour la batterie immédiatement lors du démarrage de la simulation avec une stabilisation ensuite. Elle paraît sur la figure 4.21 et par effet de zoom, plus importante pour le super-condensateur que pour la batterie mais elle n'est en fait ici que de 1%. Finalement, nous pouvons observer qu'il apparaît nettement que les batteries et super-condensateurs participent activement à la fourniture du courant délivrée sur le bus.

6.3. REPONSE DU SYSTEME POUR UN PROFIL DE VENT MONOTONE CROISSANT DE FAÇON DISCRETE. ETUDE DYNAMIQUE.

Le profil de vent que nous avons choisi afin de montrer la dynamique du modèle développé est un profil par palier variant par pas de 2 m/s dans la plage de régulation de l'éolienne Anelion. Nos résultats de simulations sont présentés dans les figures 4.23 à 4.29.

On observe que la tension du bus est stabilisée à la valeur définie comme paramètre du bus (après une phase initiale en début de simulation) quelque soit la valeur de la vitesse du vent en entrée de la modélisation. Afin d'évaluer la qualité de la simulation effectuée, nous reportons un zoom de la tension du bus autour de sa valeur nominale dans la figure 4.25. Nous constatons alors que même dans la phase initiale, lorsque l'éolienne est soumise à un vent faible, le modèle montre que la tension atteint rapidement sa valeur nominale à 0.3% près.

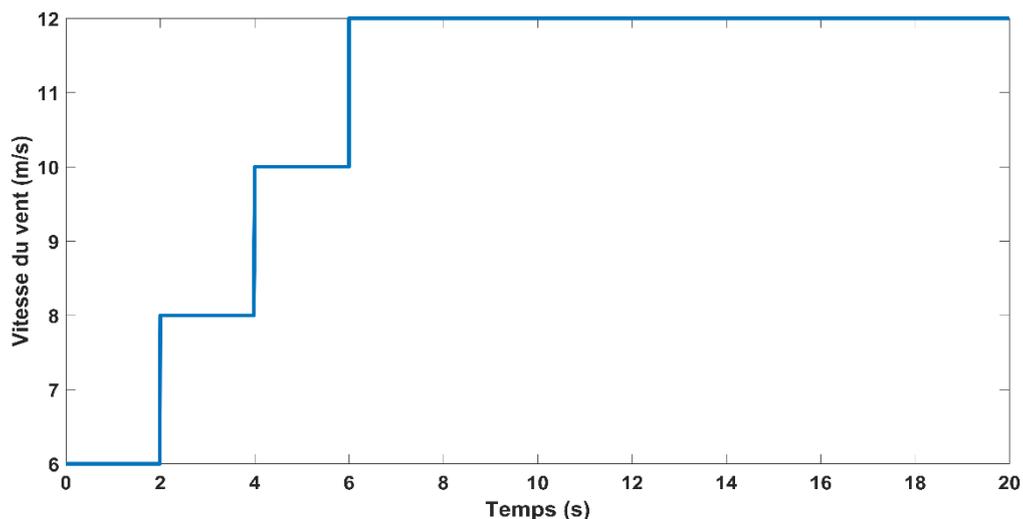


Figure 4.23: Profil du vent utilisé pour l'étude dynamique

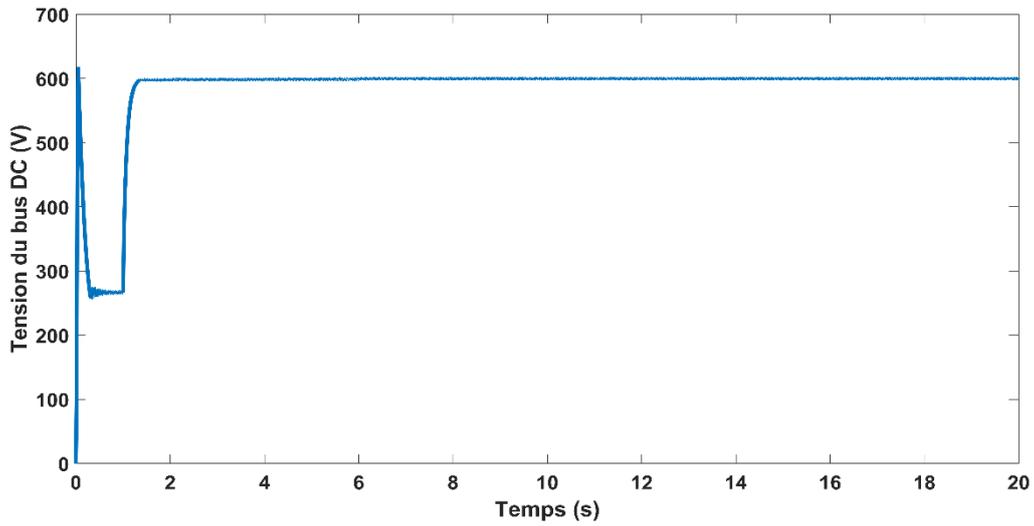


Figure 4.24: Tension du bus DC pour l'étude dynamique

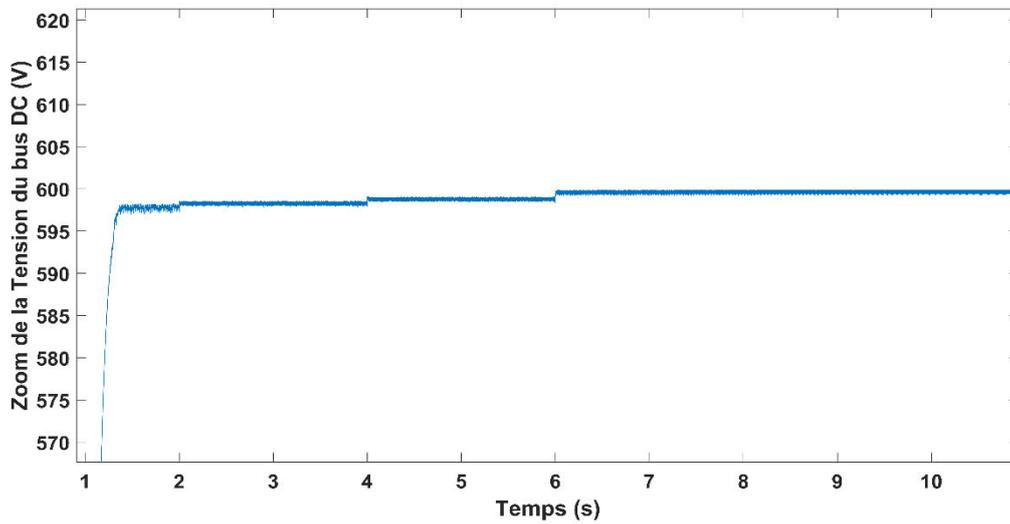


Figure 4.25: Zoom de la tension du bus DC pour l'étude dynamique

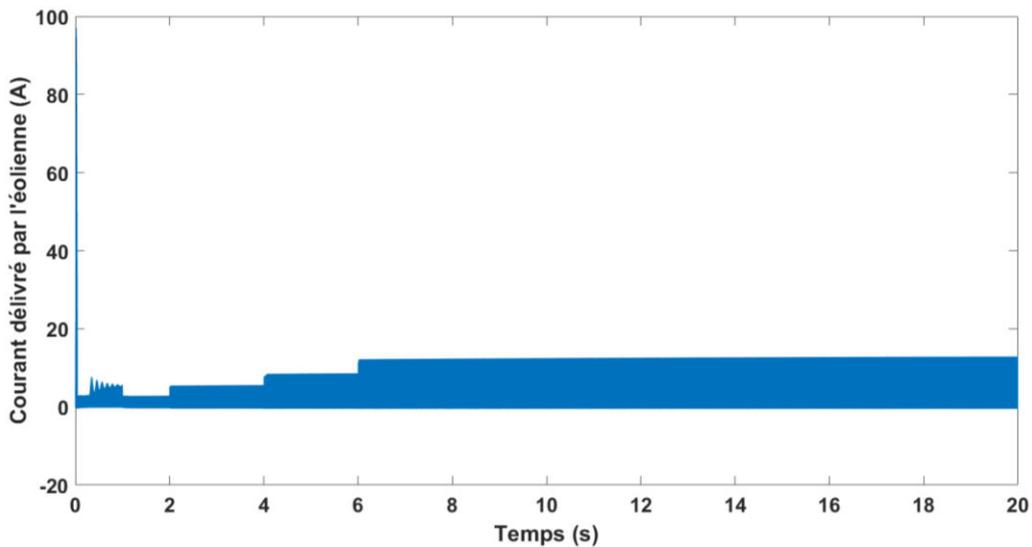


Figure 4.26: Courant délivré par l'éolienne pour l'étude dynamique

Les figures 4.25 et 4.26 et 4.27 valident le comportement dynamique du modèle montrant clairement qu'avec une tension constante délivrée sur le bus, la génératrice éolienne alimente le bus proportionnellement à la vitesse du vent.

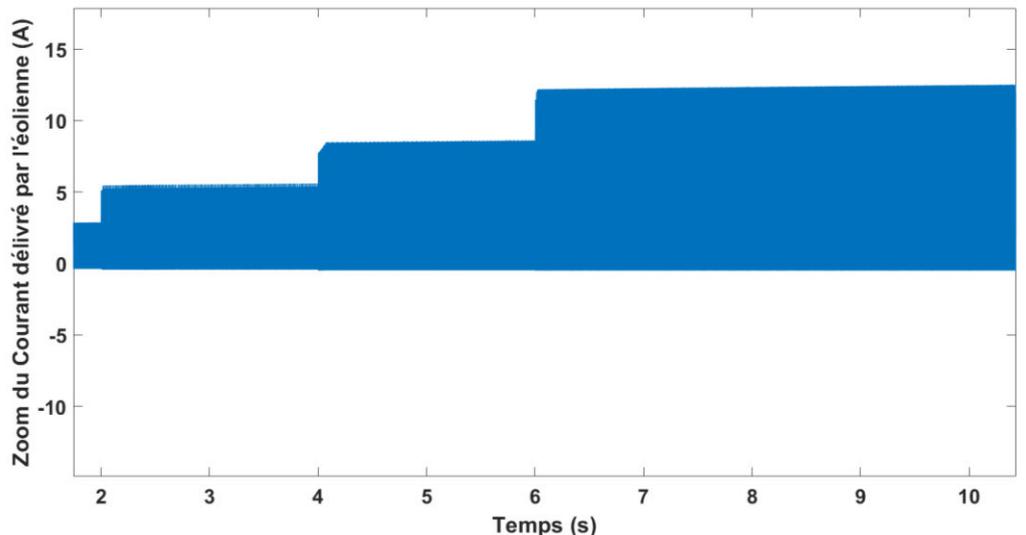


Figure 4.27: Zoom du courant délivré par l'éolienne pour l'étude dynamique

La valeur du courant délivré par l'éolienne augmente avec la variation de la vitesse du vent jusqu'à une valeur de 12.3A pour une vitesse de 12m/s. Cette valeur de courant vérifie la valeur du courant du bus qui a été trouvée également pour cette vitesse dans l'étude statique. Enfin, nous reportons dans les figures 4.28 et 4.29 le comportement dynamique du courant de bus en réponse au profil de vent par échelons tel que choisi en entrée de l'éolienne dans cette partie de l'étude.

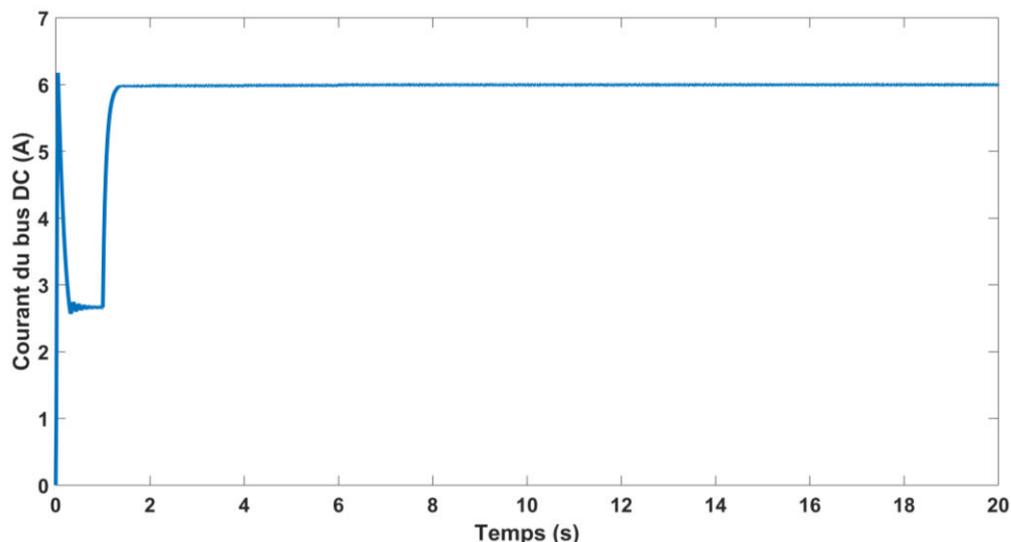


Figure 4.28: Courant du bus DC pour l'étude dynamique

La figure 4.29 est un zoom permettant de mettre en évidence et d'analyser la stabilité du bus et ainsi la pertinence des choix faits pour notre modèle Matlab/Simulink.

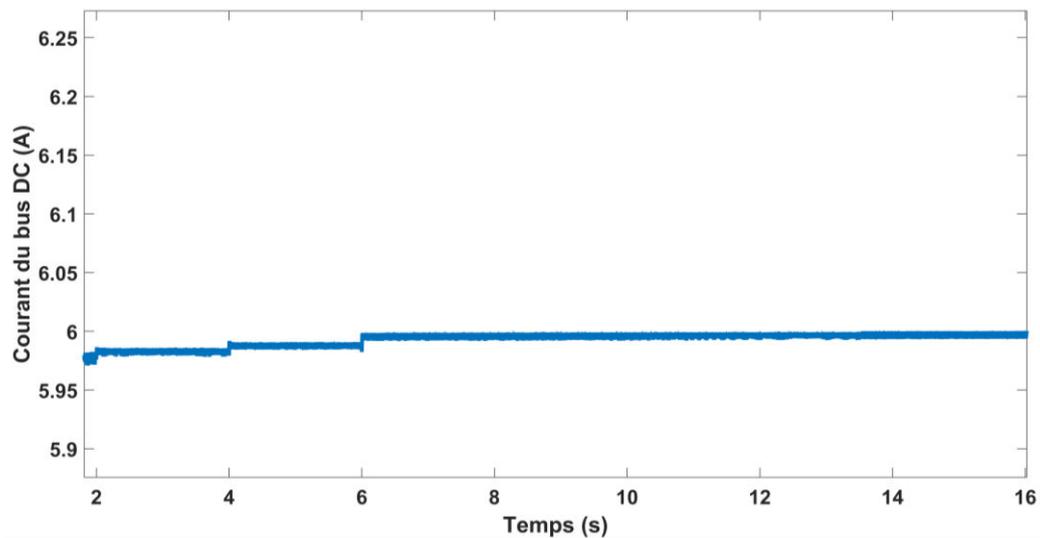


Figure 4.29: Zoom du courant de bus DC pour l'étude dynamique

Les figures 4.28 et 4.29 valident parfaitement notre modélisation pour une résistance de charge de 100Ω le courant est à presque 6 A pour toute la plage de vitesse.

Dans cette étude de la réponse dynamique du modèle du système complet, nous représentons maintenant les grandeurs électriques, tension et courant de la partie stockage dans les figures 4.30 et 4.31 pour les batteries et dans les figures 4.31 et 4.32 pour le supercondensateur avec les mêmes échelles que pour l'étude statique précédente.

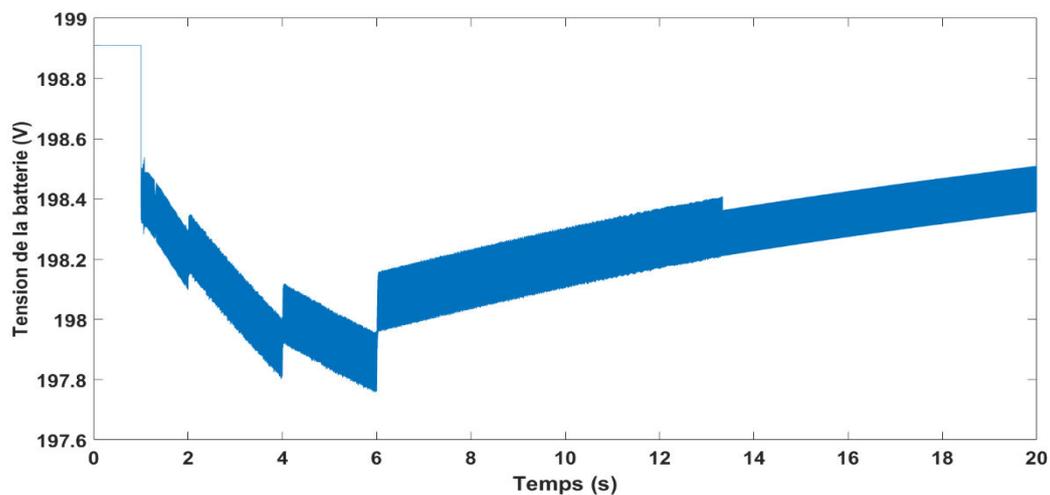


Figure 4.30: Zoom de la tension de la batterie au plomb

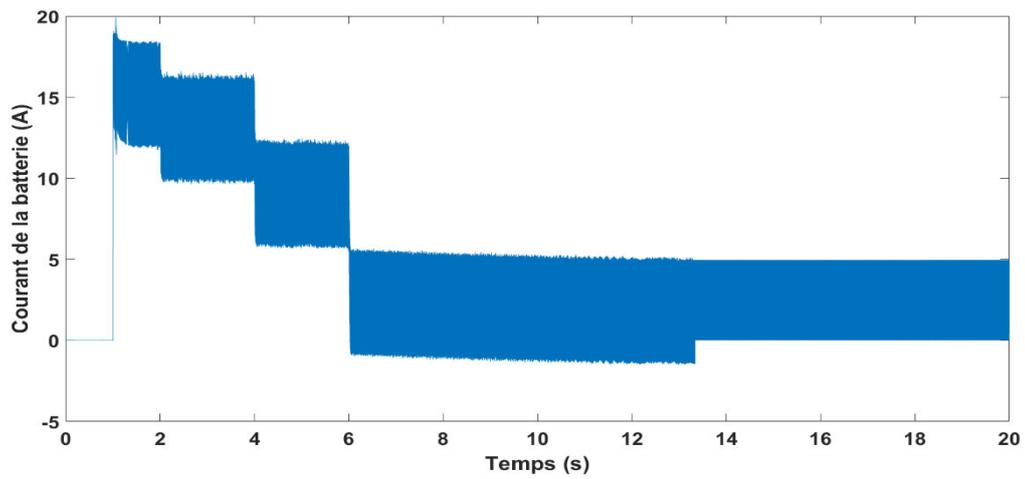


Figure 4.31: Courant de la batterie au plomb pour l'étude dynamique

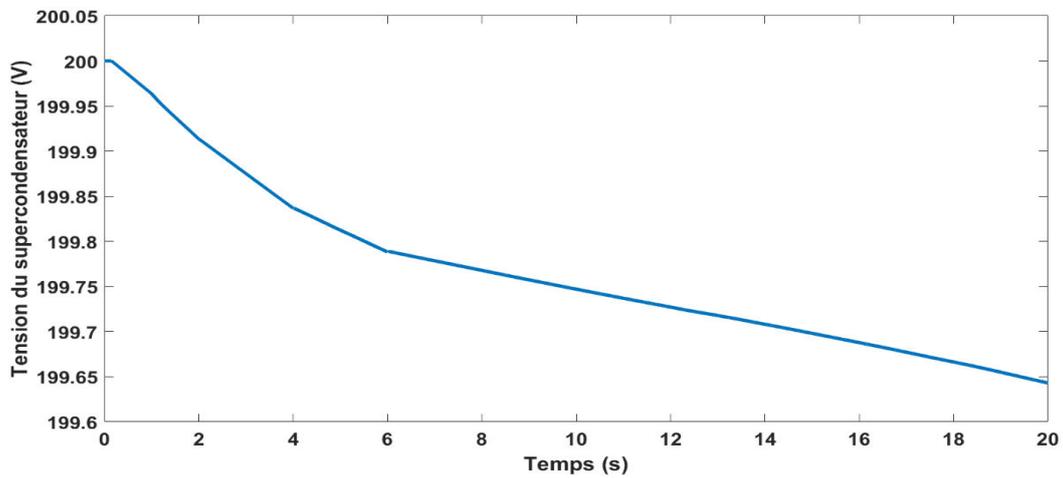


Figure 4.32: Tension du super-condensateur pour l'étude dynamique

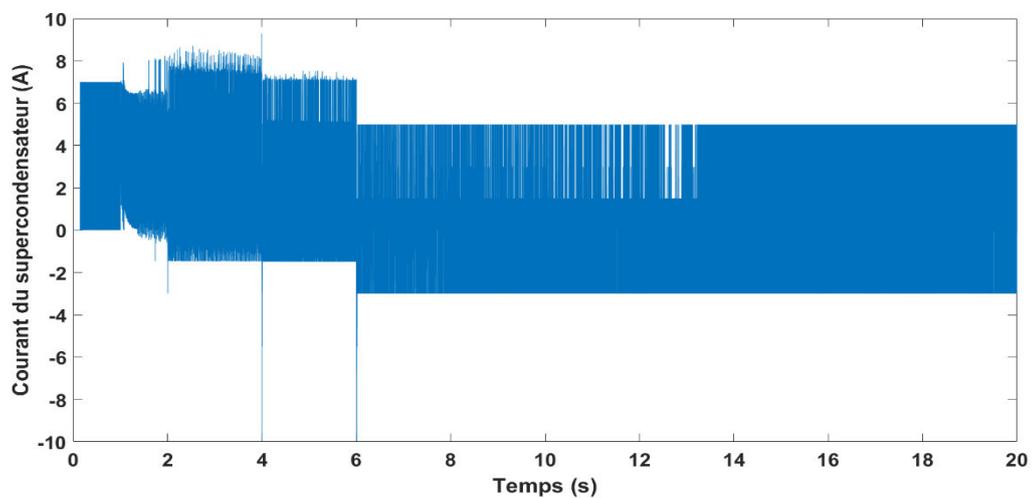


Figure 4.33: Courant du super-condensateur pour l'étude dynamique

Dans les figures 4.30 à 4.33, nous observons dans le comportement des tensions et courants des éléments de stockage des réponses plus perturbées. Néanmoins, nous constatons également que les variations des tensions des batteries et super-condensateurs restent faibles. Les courants des deux éléments de stockage se stabilisent rapidement après chaque changement de vitesse de vent en suivant une évolution inverse du courant généré (et donc de la puissance délivrée par la génératrice éolienne. Les connexions du super-condensateur et de la batterie apportent ainsi un rôle important pour le contrôle de la stabilité du bus, ce qui a été confirmé par l'observation faite précédemment d'une stabilité de la tension du bus à 0.3% près malgré les variations abruptes considérées pour la vitesse du vent.

6.4. REPONSE DU SYSTEME POUR UN PROFIL DE VENT VARIABLE DE FAÇON CONTINUE ET ALEATOIRE.

Le profil de vent que nous avons choisi pour la validation complète et réaliste de notre étude correspond à une variation continue et non monotone de la vitesse du vent.

Ceci correspond en effet au mode de fonctionnement réel de l'éolienne avec un profil de vent variable dans la plage de régulation indiquée par le constructeur.

Après l'étude statique basée sur une vitesse de vent constante permettant de valider notre modèle à une valeur nominale donnée, puis faisant suite à une étude dynamique basée sur une variation de la vitesse de vent par échelons, permettant la validation de la réponse dynamique de notre système modélisé, telle que présentée dans les paragraphes précédents, cette nouvelle étude effectuée pour des variations continues et non-monotones valide notre travail de modélisation de la chaîne éolienne complète dans le cas de son fonctionnement normal.

Nous présentons dans les figures 4.34 à 4.43 les résultats de cette simulation. Nous avons choisi comme profil de vent, Figure 4.34, un vent dont la vitesse varie de façon continue et non-monotone inspirée par les conditions anémométriques présentées sur le site du laboratoire LMOPS à l'IUT de Thionville-Yutz, en Moselle-France et donc aux conditions de fonctionnement réelles de la génératrice éolienne Anélium servant de référence à notre étude.

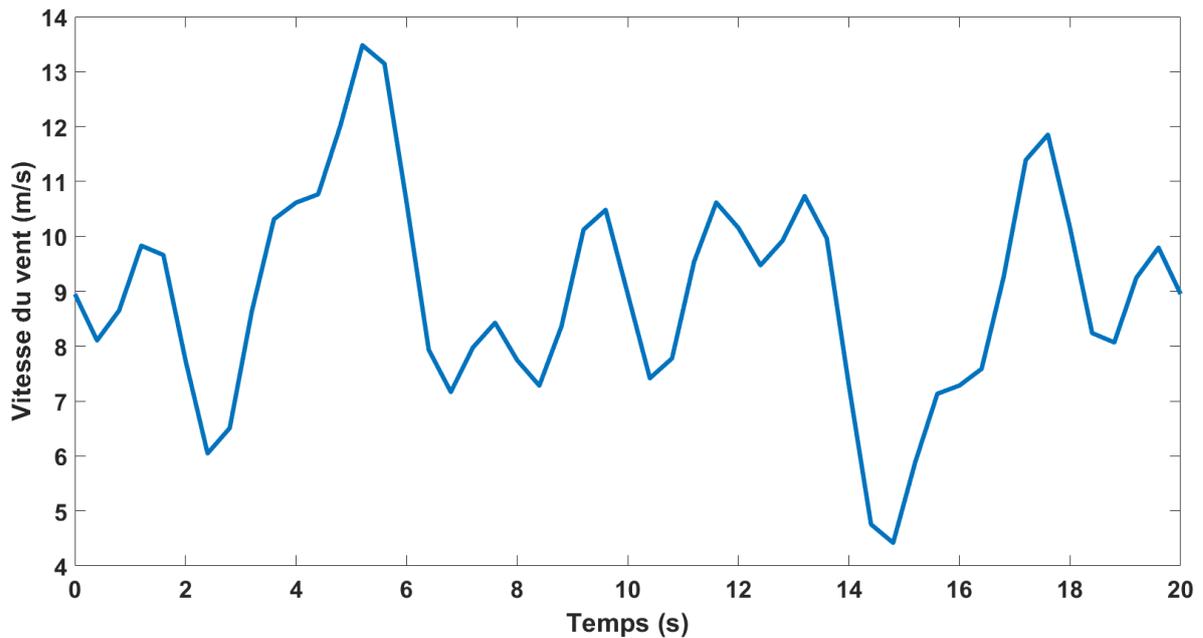


Figure 4.34: Profil du vent variable de façon continue et aléatoire

Dans les figures suivantes, nous présentons les réponses en tension et courant aux différents endroits du système complet que nous avons modélisé. Nous ferons ensuite la synthèse en analysant les tensions et courants du bus DC lorsque les deux étages y sont connectés.

Dans la figure 4.35, nous représentons le courant redressé en sortie de l'étage éolien dans ce mode de fonctionnement réel.

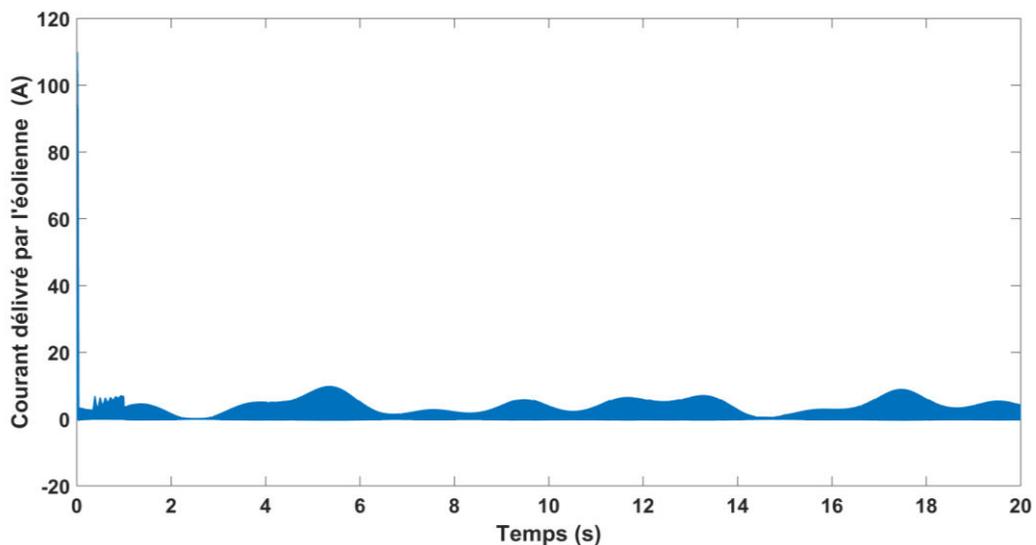


Figure 4.35: Courant redressé en sortie de l'étage éolien en mode de fonctionnement réel.

Dans la réponse en courant représentée dans la figure 4.35, nous observons au début de la simulation un pic de courant de type impulsion de Dirac. Nous avons déjà observé ce pic dans les résultats de simulations, tant au niveau des courants que des tensions précédemment mais pas encore discuté. Nous l'observerons aussi dans les réponses présentées dans les figures suivantes. Ce pic a été analysé comme dépendant de l'outil Matlab/Simulink utilisé pour la modélisation. Il est principalement dû à la prise en compte de l'ensemble des paramètres qui se fait progressivement par le logiciel. Or, la modélisation présentée ici fait intervenir de nombreux paramètres interdépendants qui sont calculés au fur et à mesure et leur pleine influence n'est possible qu'après plusieurs balayages du logiciel sur l'ensemble du modèle. Nous pouvons alors considérer que cette première partie temporelle, comme présentée dans la réponse en courant de l'étage éolien, figure 4.35, n'est pas significative du fonctionnement du modèle. Nous retrouvons cette partie dans l'ensemble des réponses de la chaîne éolienne présentées par la suite.

Les informations significatives que l'on peut alors extraire de la figure 4.35 sont l'observation de très faibles variations qui suivent les variations de la vitesse du vent en entrée. Ainsi, les variations du courant du bus DC et donc celui délivré par la GSAP (PMSG) en sortie de la génératrice éolienne suivent le profil variable du vent, la réponse du courant répondant parfaitement à la variation de la vitesse du vent appliquée à notre modélisation dans la plage de vitesse régulée jusqu'à 14m/s.

De la même façon nous analysons les tensions et courants en sortie de l'étage de stockage, les résultats étant présentés dans les figures 4.36 à 4.39. Comme précédemment, les échelles de la représentation sont relativement dilatées afin de pouvoir analyser ces variations.

Nous commençons cette analyse en considérant les tensions et courants des batteries de stockage, Figures 4.36 et 4.37. Dans notre modèle, nous avons fait démarrer la fourniture d'énergie par la batterie à partir d'une seconde. Ceci est bien mis en évidence dans la réponse tension et courant de la batterie. Comme nous le verrons par la suite, pendant ce premier temps, seule l'étage éolien fournit la puissance au bus DC de sortie.

En fonctionnement réel sans apport énergétique extérieur autre que celui apporté par la génératrice éolienne, dans un système hybride avec stockage, l'étage éolien délivre son maximum de puissance directement au bus et n'assure pas la recharge de ou des batteries et super-condensateurs. Pour cette raison, on observe, avec le temps, une chute de

la tension en sortie de la batterie, figure 4.36. Par contre, nous observons également, figure 4.37, que la batterie assure pleinement sa fonction en compensant la production de courant liées aux conditions anémométriques de l'étage éolien afin de pouvoir alimenter le bus de sortie DC en fonction de la charge connectée.

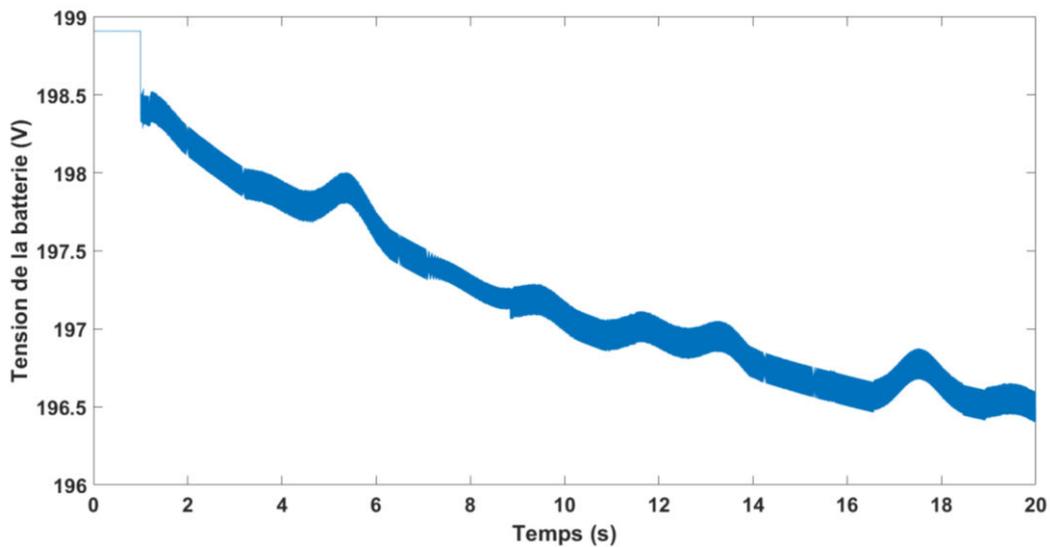


Figure 4.36: Tension de la batterie pour le mode de fonctionnement réel

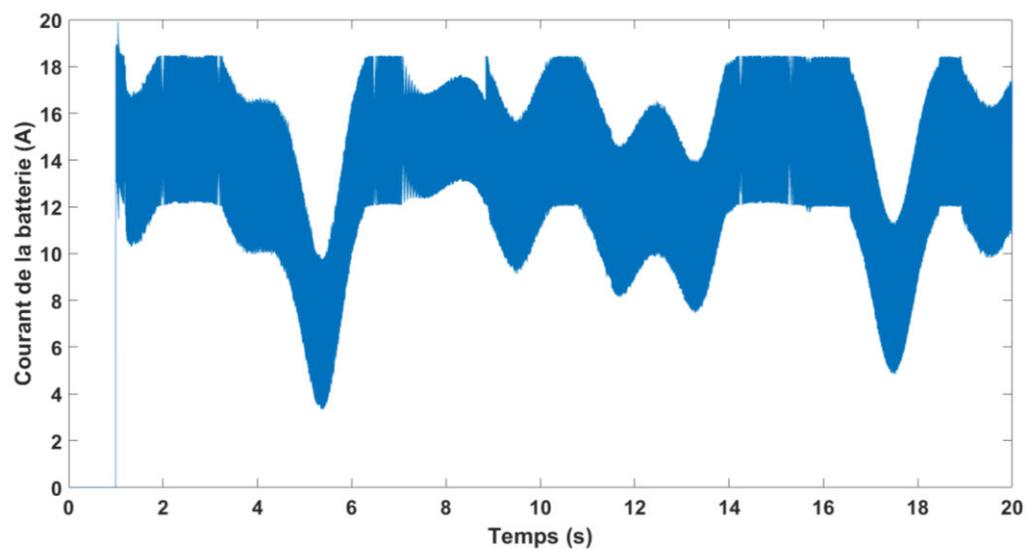


Figure 4.37: Courant de la batterie pour le mode de fonctionnement réel

Nous reportons dans les figures 4.38 et 4.39, le comportement des tensions et courants en sortie du super-condensateur. Nous observons également, et pour les mêmes raisons que dans le cas de la batterie, une chute de la tension de sortie du super-condensateur avec le temps. Par contre, nous observons des variations beaucoup plus rapides du courant. La fréquence de ces variations est directement liée à la dynamique des

super-condensateurs. Néanmoins, la prudence veut qu'il faut rappeler que ce sont des résultats de simulation et qu'en pratique, il est à considérer pour le courant les variations moyennées car l'alimentation d'une charge résistive entraîne obligatoirement des temps de réponse plus longs.

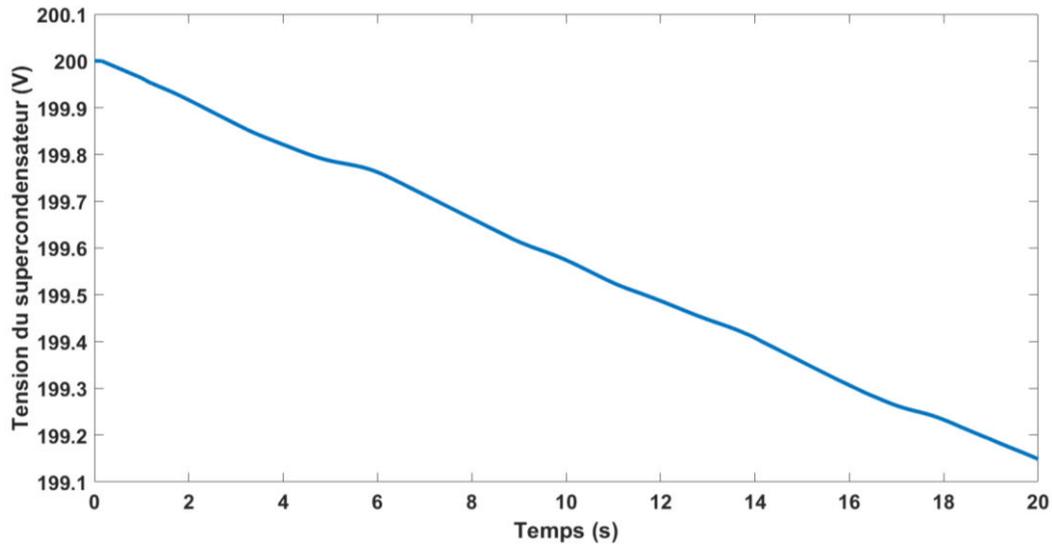


Figure 4.38: Tension du super-condensateur pour le mode de fonctionnement réel

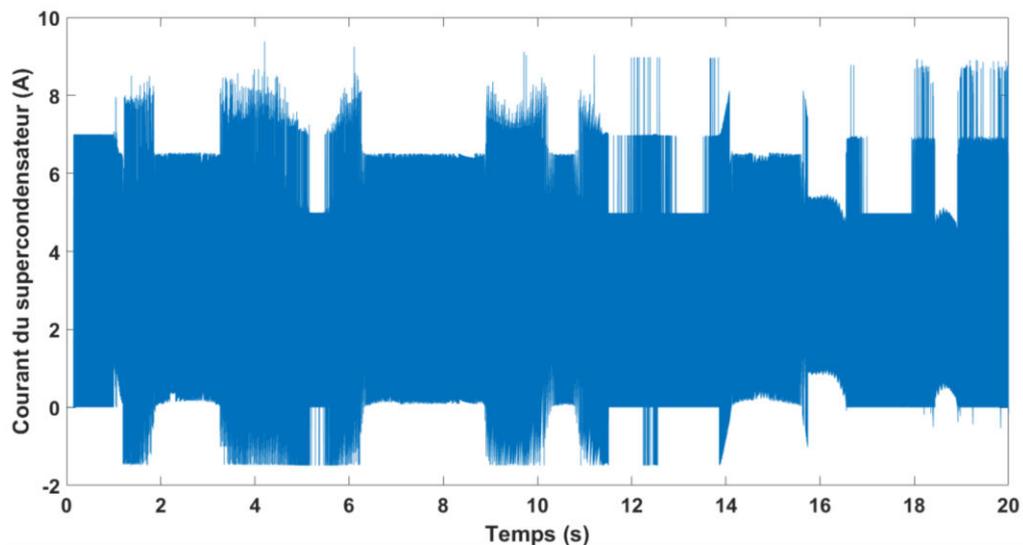


Figure 4.39: Courant du super-condensateur pour le mode de fonctionnement réel

Finalement, et pour conclure cette étude, l'ensemble de ces sources d'énergie étudiées de notre système hybride, éolien avec stockage, doivent alimenter le bus DC et lui assurer un fonctionnement satisfaisant avec un maximum de puissance délivrée par la génératrice éolienne, compensée par l'étage de stockage qui assure en parallèle, la stabilité du bus autour d'une valeur fixée. C'est ce que nous présentons dans les quatres figures

suivantes, avec la représentation de la tension du bus dans les figures 4.40 et 4.41 (Zoom de la tension du bus) et avec la représentation du courant de bus alimentant une charge de 100 ohms, dans les figures 4.42 et 4.43 (Zoom du courant de bus).

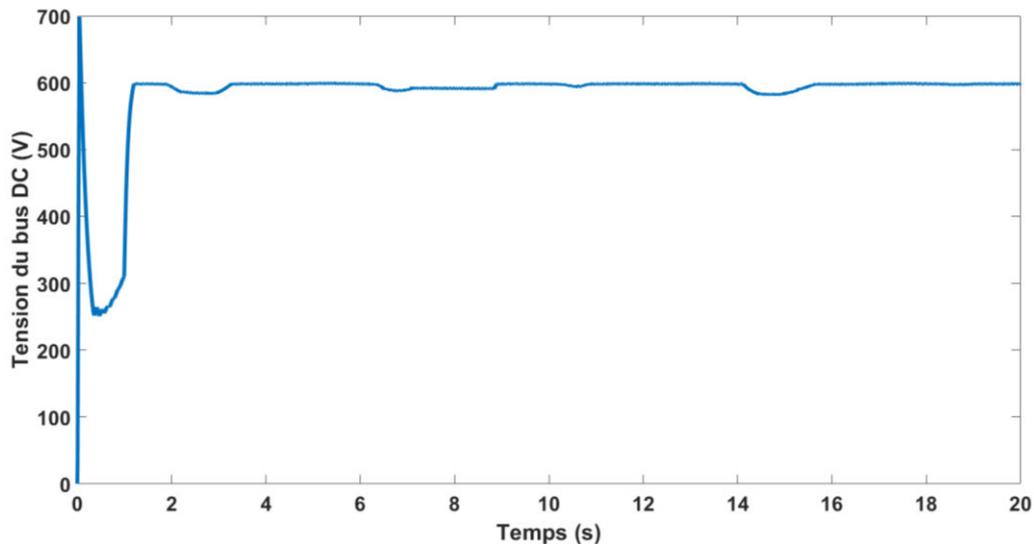


Figure 4.40: Tension du bus HVDC pour l'étude réelle

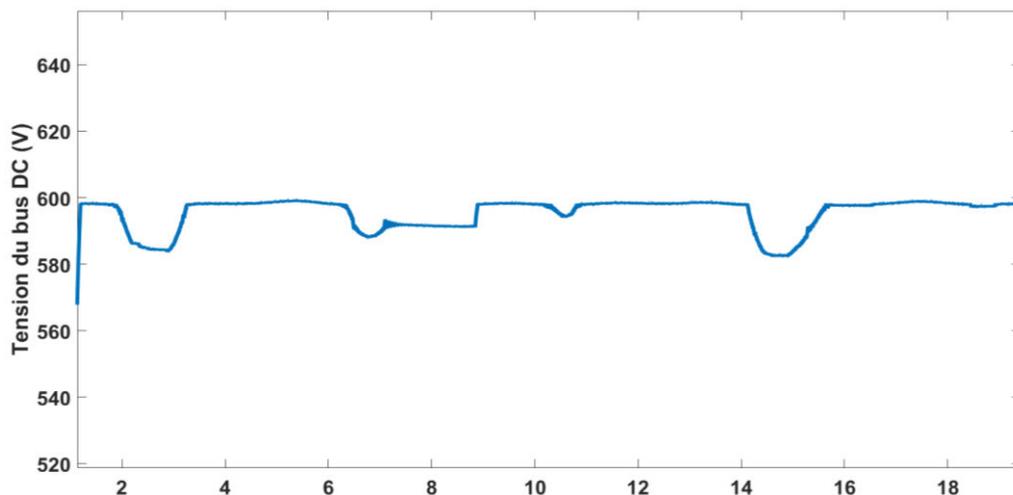


Figure 4.41: Zoom de Tension du bus HVDC pour l'étude réelle

Nous observons dans la réponse en tension représentée dans la figure 4.40 les différentes parties temporelles précédemment discutées. Après la phase de démarrage du processus de simulation par le logiciel Matlab/Simulink et dans un temps inférieur à 1 sec, seule la génératrice éolienne fournit de l'énergie et le bus n'atteint pas sa valeur nominale de fonctionnement. En effet, comme signalé précédemment, pendant cette partie, l'étage de stockage ne fournit pas d'énergie et n'agit donc pas sur le bus de sortie DC. Nous voyons

clairement alors que lorsque le système n'est composé que par cet étage éolien, la tension du bus ne peut être assurée à un niveau constant et pré-défini.

Enfin, dans la troisième partie de la réponse, l'ensemble du système est actif avec en particulier l'action du super-condensateur puis des batteries démarrant au bout d'une seconde après le début de la simulation. Cette partie temporelle du fonctionnement correspond donc à la plage de fonctionnement normal de l'éolienne et nous observons également très clairement que la tension du bus est stabilisée autour de la valeur de 600V telle que fixée initialement. Dans cette zone, la stabilité de la tension de sortie du bus est très bonne avec une faible variation autour de sa valeur nominale inférieure à 2%. Ainsi, on observe clairement que la stabilité du bus est assurée grâce au stockage couplé en parallèle avec la modélisation de la chaîne éolienne : quelque soit le profil réel du vent utilisé pour notre modélisation le stockage appliqué à cette dernière assure parfaitement la stabilité du bus.

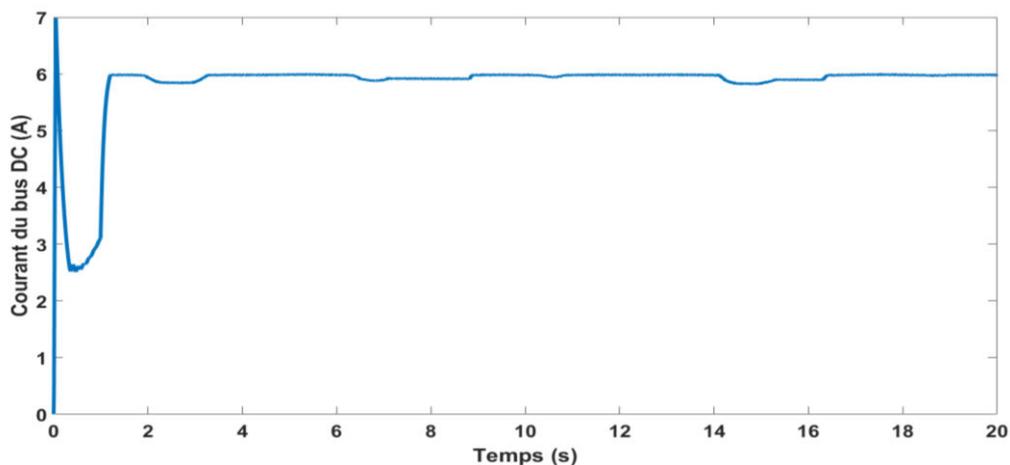


Figure 4.42: Courant du bus DC en mode de fonctionnement réel

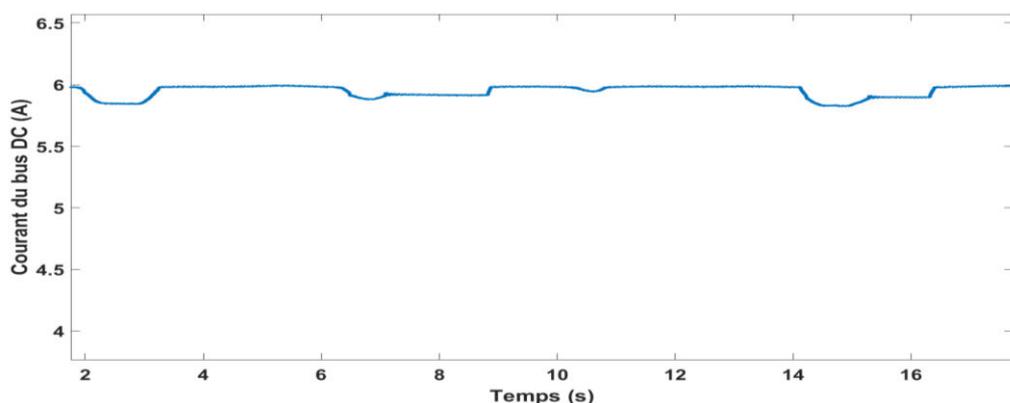


Figure 4.43: Zoom du courant de bus DC en mode de fonctionnement réel

Les figures 4.42 et 4.43 présentant le comportement du courant du bus montrent également la qualité de celui-ci dans le cas réel. Les variations de courant que l'on observe correspondent bien aux variations de la tension du bus autour de sa valeur nominale sachant par ailleurs que nous avons considéré une charge purement résistive connectée au bus.

Ces résultats basés sur des conditions et un environnement réel de fonctionnement confirment ainsi l'intérêt d'associer à une source d'énergie éolienne, un système de stockage performant.

7. CONCLUSION

Les résultats obtenus par la simulation montrent l'efficacité d'un système hybride composé d'un générateur éolien avec stockage lorsque la chaîne de conversion éolienne est couplée avec un ensemble de batteries et un super-condensateur. Cette topologie permet l'optimisation de la production énergétique d'origine éolienne et la stabilité de la tension du bus (fixée ici à 600V). Dans la modélisation du système et sa simulation dynamique, nous trouvons que la tension du bus est parfaitement stable à 2% près.

Ces résultats montrent aussi clairement et de façon originale à notre connaissance, la possibilité de modéliser un système de conversion éolien à partir de la fiche technique du fabricant. Cette topologie peut fonctionner pour n'importe quel système de conversion éolien évitant ainsi l'introduction des algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) dans le convertisseur de sortie de la chaîne éolienne. Considérant ainsi la génératrice avec son propre système de régulation et à partir des données constructeur, nous avons considéré une nouvelle stratégie de contrôle basée sur la puissance réelle de l'éolienne et la puissance redressée à la sortie du convertisseur AC/DC. La stabilisation de la tension du Boost a pu être possible avec le couplage de la chaîne éolienne avec l'ensemble de batteries et un super-condensateur assurant la production de la puissance nécessaire en cas de vitesse de vent faible et assurant la stabilisation du bus à un niveau de tension constant.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE IV

- [1] Energy Storage: « A key Technology for Decentralized power Quality and clean Transport, office for official publications of the European Communities, Luxembourg 2001.
- [2] G. Octavia Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », thèse de l'École Nationale Supérieure d'arts et Métiers, Centre de Lille, 2005.
- [3] Z. T. Ternifi, « Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique injectée au réseau à partir d'un système photovoltaïque », thèse de l'université d'Oran 2019.
- [4] A. Hijazi, "Electrothermal modeling, control and sizing of supercapacitor's energy storage system taking into account the ageing : application to the recovery of braking energy of electrical bus", Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 2010
- [5] D. Shin, Y. Kim, J. Seo, N. Chang, Y. Wang, and M. Pedram, "Battery-supercapacitor hybrid system for high-rate pulsed load applications," in 2011 Design, Automation & Test in Europe, 2011, pp. 1–4.
- [6] J.P. Barton and D.G. Infield, "Energy Storage and its Use With Intermittent Renewable Energy," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol.19, June 2004
- [7] A. Marquet, C. Levillain, A. Davriu, S. Laurent, Ph. Jaud, « Stockage d'électricité dans les systèmes électriques », Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique D 4030.
- [8] Accumulateur : 40 MW pendant 7 minutes ; Revue de l'électricité et de l'électronique, REE, n°10, Novembre 2003, PP8.
- [9] R. Hebner, J. Beno, A. Walls, "flywheel batteries come around again" IEEE Spectrum ,April 2002, PP.46-51.
- [10] W.W. Andreas Jossen, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Reichardt Verlag, 2006.
- [11] N. Achaïbou. Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque. Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 1-6.
- [12] forum-camping-car.fr/camping-car/243/batteries-types-plomb-agm-vrla-gel.html, consulté en mai 2017.

- [13] T. M. Layadi, G. Champenois, « Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources ». Symposium de Génie Electrique, Cachan, France, (Jul 2014)
- [14] A. Ould Mohamed Yahya , A. Ould Mahmoud, I. Youm, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) » Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.
- [15] S.B. The Bogdan, Z.M. Salameh, « Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system ». IEEE Transactions on Energy Conversion 11 (2), 367–375, (1996).
- [16] R. Belfkira, L. Zhang and G. Barakat. Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel powergeneration unit. Solar Energy 2010.
- [17] M. Chikh, « Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté au sites isolés de L'Algérie », thèse de magister, CDER, (1994)
- [18] A. Bin, Y. Hongxing et S. L. Hui, «Computer aided design for pv/wind hybrid system, » Renewable Energy, vol. 6, n° 110, pp. 1491-1512, 2003.
- [19] C. Chaurey and S. Deambi., « Battery storage Power systems: an overview». Renewable Energy 2 (3):227-235, (1992).
- [20] A. Derrouazin, « Contribution à l'optimisation d'un Système intelligent de routage des sources d'énergie hybride pour application à l'habitat », thèse de l'université d'oran, 2017
- [21] A. K. Shukla, S. Sampath, K. Vijayamohanan, "Electrochemical supercapacitors: Energy storage beyond batteries", Current Science, vol. 79, no 12, pp. 1656-1661, 2000.
- [22] G. Alcicek, " Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique.", thèse de Doctorat de l'université de technologie de Belfort Montbéliard, décembre 2014.
- [23] R. Saisset, "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques.", thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, avril 2004.
- [24] N. Rizoug, "Modélisation électrique et énergétique des super-condensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de

- supercondensateurs basse tension en grande puissance.”, thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Lille, février 2006.
- [25] M. Zandi, « Contribution au pilotage des sources hybrides d’énergie électrique » thèse de doctorat de L’Institut National Polytechnique de Lorraine, Novembre 2010.
- [26] X. Andrieu, L. Moreau, B. Pichon, "Etude comparative d'électrodes de carbone pour super-capacités à électrolyte organique", Journées d’Etudes sur les Super-condensateurs, Paris, Février 1998
- [27] P. Le Goff, "Quelques informations sur des techniques de stockage de l’énergie", Site Internet <http://pl.legoff.free.fr>.
- [28] F. Belhachemi, Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance, thèse de doctorat de L’Institut National Polytechnique de Lorraine, décembre 2001.
- [29] H. Boussetta, “Modélisation multi-physiques et simulation globale de systèmes autonomes sur puce.”, thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, février 2010.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre les Laboratoires LGEER de L'université de Chlef Algérie, et le Laboratoire LMOPS de L'université de Lorraine et de CentraleSupélec Metz. L'étude présentée dans cette thèse s'inscrit dans le cadre général de l'amélioration des performances des systèmes de production d'énergie électrique à base des énergies renouvelables. Dans notre travail nous nous sommes principalement attaché à la modélisation et optimisation de la chaîne de production d'électricité d'origine éolienne intégrant les éléments de stockages de types batteries et super condensateurs.

Nous avons donc entrepris de modéliser dans l'environnement Matlab/Simulink la stabilité du réseau est assurée par le stockage intégré avec des différents types.

En ce qui concerne l'éolien, dans ces travaux de thèse et après de nombreux essais réalisés de façon empiriques en modélisation se basant uniquement sur la vitesse du vent, nous avons finalement proposé une nouvelle approche topologique pour contrôler le fonctionnement de l'aérogénérateur dans sa plage de vitesse en modélisant la réponse de vitesse de rotation en fonction de la vitesse d'entrée du vent. Cette topologie originale basée sur les données techniques fournies par le constructeur dans la documentation technique généralement fournie avec l'éolienne permet de faire fonctionner la turbine éolienne à son point de puissance maximale MPP, sans avoir à considérer l'obligation d'introduire un algorithme pour le suiveur de ce point de puissance maximum (MPPT).

Nous avons alors optimisé par simulation le fonctionnement des différentes parties de modélisation de la chaîne éolienne complète. Ainsi, nous avons modélisé individuellement puis associé dans un même ensemble de production, le fonctionnement de la turbine, de la génératrice GSAP (PMSG), du convertisseur AC/DC et finalement du convertisseur DC/HVDC.

La modélisation de cette étage de production d'énergie éolienne est également une étude originale obtenue en comparant les résultats des simulations des différentes parties avec les informations de la fiche technique du constructeur d'une éolienne individuelle.

Cette modélisation est basée sur une stratégie de commande possiblement utilisable pour toutes ces éoliennes de moyenne puissance avec un système de suivie de courbe de puissance directement intégré à l'aérogénérateur.

Dans cette partie de l'étude, nous avons également confirmé la possible efficacité de la commande d'un convertisseur Boost utilisant les données du constructeur d'un côté et la modélisation utilisée pour la partie du redressement AC/DC d'un autre côté.

Dans le micro-réseau étudié, la stabilité en tension du bus HVDC est assurée par les dispositifs de stockage associés à la chaîne éolienne. Nous avons alors mené également une étude approfondie sur la partie de stockage composée d'un super condensateur actif permettant la compensation des variations rapides de production de la génératrice éolienne et intervenant donc dans les temps courts et de batteries assurant le maintien sur du long terme de la tension du bus tout en compensant les besoins en énergie que la génératrice éolienne ne pourrait produire. La modélisation et simulation de la partie stockage ont été faites indépendamment de la partie éolienne afin d'optimiser le fonctionnement, séparément du super-condensateur, des batteries, puis de l'ensemble super-condensateur et batteries. Finalement cet ensemble a été connecté en parallèle avec l'étage éolien au bus HVDC. Ce micro réseau a naturellement fait l'objet d'une validation. Ces résultats obtenus dans la modélisation de la chaîne complète ont montrés la faisabilité de coupler les deux systèmes de stockage pour assurer la stabilité de la tension du Bus lorsque la source d'énergie provient d'une génératrice éolienne. De plus nos résultats de simulation ont permis de montrer la justesse du dimensionnement de notre micro-réseau.

Les résultats obtenus pendant ce travail de thèse ouvrent des perspectives en recherche fondamentale, expérimentale et appliquée que nous comptons mener dans nos équipes voire transférer dans d'autres laboratoires. Il s'agit en particulier de valider notre étude sur d'autres modèles d'éoliennes de puissance différente de celle que nous avons utilisée. Ces futurs travaux devront être associés à un autre dimensionnement de la partie

stockage et de la partie conversion avec éventuellement un changement de composants, à définir, mais également à une étude et reconsidération des caractéristiques de la génératrice éolienne. Enfin, pour les perspectives expérimentales et appliquées, la validation de nos résultats sera possible avec la fin de l'assemblage du banc éolien de laboratoire en cours actuellement au LMOPS de l'Université de Lorraine à Thionville-Yutz. Dans le cadre de la coopération avec les collègues du laboratoire LGEER de l'Université de Chlef, des études de stagiaires et nouveaux doctorants sont envisagées pour supporter cette nouvelle étude.

Table des figures et Table des matières

TABLE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1 : Production des énergies renouvelables dans le monde	17
Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale biomasse.....	19
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique	23
Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	26
Figure 1.5 : Exemple de la solaire thermique haute température.....	30
Figure 1.6 : Exemple Les installations sur site isolé	34
Figure 1.7 : Exemple d'une installations raccordées au réseau injection totale	35
Figure 1.8 : Exemple d'une installations raccordées au réseau injection surplus	36
Figure 1.9 : Mini-centrale solaire à Ghardaïa	37
Figure 1.10 : Rotor de Savonius.....	42
Figure 1.11 : Rotor Darrieus	43
Figure 1.12 : Eolienne à axe horizontal	44
Figure 1.13 : Moulin à toit tournant.....	45
Figure 1.14 : Moulin à cage tournante	46
Figure 1.15 : Eolienne onshore.....	49
Figure 1.16 : Eolienne offshore	50
Figure 1.17 : Ferme éolienne verticales d'Adrar 10 (MW).....	52

Chapitre 2

Figure 2.1: Rose des vents	65
Figure 2.2: Ensemble d'un anémomètre et une girouette	65
Figure 2.3: Anémomètre Papillon-Robinson	68
Figure 2.4: Enregistrement anémométrique d'un modèle réel du vent.....	68
Figure 2.5: Variation de température sur la surface du globe.....	69
Figure 2.6: Déficients éléments d'une éolienne à axe horizontal.....	71
Figure 2.7: Fondation de l'éolienne	72
Figure 2.8: Type Fondation offshore : a) la fondation monopieu b) la fondation gravitaire c) la fondation en structures jacket.	73
Figure 2.9: Contrôle du calage des pales sur une maquette.....	76
Figure 2.10: Moteur : a) moteur pour commande de nacelle b) moteur pour commande de pitch c) servomoteurs Brushless CA.....	78
Figure 2.11: Chaîne éolienne utilisant la machine asynchrone	80
Figure 2.12: Chaîne éolienne utilisant une génératrice à courant continue	80

Figure 2.13: Chaîne éolienne utilisant une génératrice synchrone	81
Figure 2.14: Eolienne Anelion (laboratoire LMOPS Thionville).....	86
Figure 2.15: les différents éléments de l'Anelion	88
Figure 2.16: Vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent.....	89
Figure 2.17: Caractéristiques Puissance/Energie – V_{vent} de l'éolienne Anelion.....	90

Chapitre 3

Figure 3.1: Système de Conversion Eolienne à base de la PMSG	101
Figure 3.2: Courbe $C_p(\lambda, \beta)$	103
Figure 3.3: Schéma block de la modélisation de l'Anelion	104
Figure 3.4: Coefficient de puissance de l'Anelion (fiche technique du constructeur).....	105
Figure 3.5: Coefficient de puissance de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent.....	106
Figure 3.6: Puissance générée de l'Anelion (fiche technique Anelion).....	106
Figure 3.7: Puissance générée de l'Anelion	107
Figure 3.8: Couple mécanique de l'Anelion	107
Figure 3.9: Stratégie de commande classique	109
Figure 3.10: Vitesse de rotation de l'Anelion en fonction de la vitesse du vent	109
Figure 3.11: Représentation de la GSAP dans le plan (abc), et le plan(dq)	111
Figure 3.12: Circuit équivalent de la MSAP	113
Figure 3.13: Schéma block de l'ensemble (Anelion, PMSG, convertisseur AC/DC).....	115
Figure 3.14: Tensions statoriques de la PMSG.....	117
Figure 3.15: Courants statoriques de la PMSG	117
Figure 3.16: Conversion d'Énergie à base des Convertisseurs statiques.....	119
Figure 3.17: Caractéristiques statiques d'une diode	121
Figure 3.18: Caractéristiques de fonctionnement d'un thyristor	122
Figure 3.19: Convertisseur DC/DC boost.....	123
Figure 3.20: Convertisseur DC/DC buck	124
Figure 3.21: Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension (a) monophasé (b) triphasé.....	126
Figure 3.22: Principe de fonctionnement d'un convertisseur AC/AC.....	127
Figure 3.23: Redresseur triphasé PD3	128
Figure 3.24: Tension redressée du convertisseur AC/DC.....	130
Figure 3.25: Courant redressé du convertisseur AC/DC	130

Chapitre 4

Figure 4.1: Couplage entre batterie et super-condensateur	142
Figure 4.2: Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost	144
Figure 4.3: La commande du convertisseur Boost sous Matlab/Simulink.....	146
Figure 4.4: Diagramme de Ragone	147
Figure 4.5: Stockage d'énergie par air comprimé	149
Figure 4.6: Différents Types de stockage d'énergie	151
Figure 4.7: Schéma électrique d'une batterie.....	157

Figure 4.8: Différence entre un condensateur classique (a) et un super-condensateur (b) . 159

Figure 4.9: Schéma bloc Matlab/Simulink du modèle de stockage par batteries. 165

Figure 4.10: Schéma bloc Matlab/Simulink du modèle de stockage par super-condensateur. 166

Figure 4.11: Schéma bloc Matlab/Simulink du contrôle du convertisseur Boost de stockage. 167

Figure 4.12: Schéma bloc Matlab/Simulink du contrôle du convertisseur Buck de stockage. 167

Figure 4.13: Schéma bloc Matlab/Simulink de la commande du contrôle des convertisseurs 168

Figure 4.14: Schéma bloc du système complet éolien + stockages connectés au bus HVDC 169

Figure 4.15: Profil du vent utilisé pour l'étude statique 170

Figure 4.16: Tension du bus HVDC pour une vitesse fixe de 12 m/s 171

Figure 4.17: Courant délivré par l'éolienne pour une vitesse fixe de 12m/s..... 171

Figure 4.18: Courant du bus DC pour une vitesse fixe de 12m/s..... 171

Figure 4.19: Zoom de la tension de la batterie au plomb..... 172

Figure 4.20: Courant de la batterie au plomb 172

Figure 4.21: Zoom sur la tension du super-condensateur 173

Figure 4.22: Le courant du super-condensateur 173

Figure 4.23: Profil du vent utilisé pour l'étude dynamique 174

Figure 4.24: Tension du bus DC pour l'étude dynamique..... 175

Figure 4.25: Zoom de la tension du bus DC pour l'étude dynamique 175

Figure 4.26: Courant délivré par l'éolienne pour l'étude dynamique 175

Figure 4.27: Zoom du courant délivré par l'éolienne pour l'étude dynamique..... 176

Figure 4.28: Courant du bus DC pour l'étude dynamique 176

Figure 4.29: Zoom du courant de bus DC pour l'étude dynamique..... 177

Figure 4.30: Zoom de la tension de la batterie au plomb..... 177

Figure 4.31: Courant de la batterie au plomb pour l'étude dynamique..... 178

Figure 4.32: Tension du super-condensateur pour l'étude dynamique 178

Figure 4.33: Courant du super-condensateur pour l'étude dynamique..... 178

Figure 4.34: Profil du vent variable de façon continue et aléatoire 180

Figure 4.35: Courant redressé en sortie de l'étage éolien en mode de fonctionnement réel. 180

Figure 4.36: Tension de la batterie pour le mode de fonctionnement réel 182

Figure 4.37: Courant de la batterie pour le mode de fonctionnement réel 182

Figure 4.38: Tension du super-condensateur pour le mode de fonctionnement réel 183

Figure 4.39: Courant du super-condensateur pour le mode de fonctionnement réel..... 183

Figure 4.40: Tension du bus HVDC pour l'étude réelle 184

Figure 4.41: Zoom de Tension du bus HVDC pour l'étude réelle..... 184

Figure 4.42: Courant du bus DC en mode de fonctionnement réel..... 185

Figure 4.43: Zoom du courant de bus DC en mode de fonctionnement réel 185

TABLE DES MATIERES

<i>Remerciements</i>	III
<i>Résumé français</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
<i>Résumé arabe</i>	IX
<i>Sommaire</i>	XI

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I. Les Energies renouvelables	13
-----------------------------------------------------	-----------

<i>Sommaire du chapitre I</i>	<i>13</i>
<i>Table des figures du chapitre I</i>	<i>14</i>
1. INTRODUCTION.....	16
2. LA BIOMASSE	17
2.1. La voie sèche.....	19
2.2. La voie humide.....	19
2.3. La production de biocarburants	20
2.4. Les avantages de la biomasse.....	21
2.5. Les inconvénients de la biomasse.....	21
3. LA GEOTHERMIE.....	21
3.1. Classification de la géothermie.....	22
3.2. Les avantages de la géothermie	24
3.3. Les inconvénients de la géothermie.....	24
4. L'ENERGIE HYDRAULIQUE-HYDROELECTRIQUE.....	25
4.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydroelectrique:.....	26
4.2. Les avantages de l'énergie hydraulique	26
4.3. Les inconvénients de l'énergie hydraulique	27
5. L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE.....	28
5.1. Le solaire thermique basse température	28
5.2. Le solaire thermique haute température	29
5.3. Les centrales solaires à concentration	30
5.4. Le marché international du solaire thermique.....	30
5.5. chauffage solaire et eau chaude sanitaire.....	31
6. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	32
6.1. Les installations sur site isolé	33
6.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public.....	34
7. L'ENERGIE SOLAIRE. POTENTIEL ALGERIEN ET BILAN	35
7.1. Potentiel solaire en Algérie.....	35
7.2. Exemple de réalisation : La centrale solaire photovoltaïque de Ghardaïa	36
7.3. Les avantages de l'énergie solaire	37
7.4. Les inconvénients de l'énergie solaire.....	37
8. L'ENERGIE EOLIENNE	38

8.1.	Aérogénérateurs à axe vertical.....	38
8.2.	Aérogénérateurs à axe horizontal [24].....	42
8.3.	Le moulin à vent	43
8.4.	Les éoliennes lentes.....	45
8.5.	Les éoliennes rapides.....	46
8.6.	Eléments de COMPARAISON EOLIENNES à axe horizontal et à axe vertical	46
8.7.	l'Eolien onshore	47
8.8.	l'Eolien offshore	48
9.	L'ENERGIE EOLIENNE. POTENTIEL ALGERIEN ET BILAN.....	50
9.1.	La ferme éolienne d'Adrar	50
9.2.	Les avantages de l'énergie éolienne.....	51
9.3.	Les inconvénients de l'énergie éolienne	52
10.	CONCLUSION	52
11.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE I.....	53

Chapitre II. L'énergie éolienne 59

<i>Sommaire du chapitre II</i>	59	
<i>Table des figures du chapitre II</i>	61	
1.	INTRODUCTION.....	63
1.1.	Un peu d'histoire.....	63
1.2.	La place de l'énergie eolienne dans le mixte énergétique mondial	64
2.	LE VENT	65
2.1.	Généralités	65
2.2.	Les Mesures anémométriques	66
3.	PRODUCTION EOLIENNE DE L'ELECTRICITE	69
3.1.	Potentiel éolien mondial	69
3.2.	Conversion de l'énergie éolienne.....	70
4.	ELEMENTS MECANIKES DE L'EOLIENNE	70
4.1.	Principaux composants d'une éolienne horizontal.....	71
4.2.	Les Fondations.....	72
4.3.	Les Systèmes de Freinage de L'Eolienne	74
5.	ELEMENTS ELECTRIQUES ACTIFS DE L'EOLIENNE	77
5.1.	Motorisation d'orientation des Nacelles (Yaw control).....	77
5.2.	Motorisation angle de Calage (Pitch control)	77
5.3.	Motorisation pour le freinage	77
6.	LA GENERATRICE.....	78
6.1.	Génératrices asynchrones utilisées pour les éoliennes	78
6.2.	Génératrices à courant continu utilisées pour les éoliennes.....	80
6.3.	Génératrices synchrones utilisées pour les éoliennes	81
7.	LES CONVERTISSEURS D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ASSOCIES	84
8.	SYNTHESE DE DIFFERENTS TYPES DE GENERATEURS EOLIENS	85
9.	L'EOLIENNE ANELION SW 3.5-GT	86
9.1.	Présentation de l'éolienne Anelion SW 3.5-GT.....	86
9.2.	La Caractéristique $V_{rotation}-V_{vent}$ de l'éolienne Anelion	89
9.3.	Les Caractéristiques Puissance/energie – V_{vent} de l'éolienne Anelion.....	90
10.	CONCLUSION	91
11.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE II	92

Chapitre III. Etude et modélisation d'une éolienne en fonctionnement autonome 97

Sommaire du chapitre III 97
Table des figures du chapitre III 99

1. INTRODUCTION 101
2. MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE 102
3. STRATEGIE DE CONTROLE 108
4. LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS (MSAP) 110
 - 4.1. Hypothèses simplificatrices 110
 - 4.2. Equations caractéristiques d'une MSAP 110
 - 4.3. Représentation de la MSAP dans le plan de Park 111
 - 4.4. Circuit équivalent de la MSAP 113
 - 4.5. Expressions du couple électromagnétique de la MSAP 113
5. LA GENERATRICE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS (GSAP) 114
6. L'ETAGE DE CONVERSION ELECTRIQUE EN SORTIE D'UNE GSAP 118
 - 6.1. Conversion alternatif/continu (AC/DC) 120
 - 6.2. Conversion continu/continu (DC/DC) 123
 - 6.3. Conversion continu/alternatif (DC/AC) 125
 - 6.4. Conversion alternatif/alternatif (AC/AC) 126
 - 6.5. Redressement non commandé (diodes) 128
7. L'ETAGE DE CONVERSION DC/HVDC RETENU DANS L'ETUDE 129
8. CONCLUSION 131
9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE III 133

Chapitre IV. Etude et modélisation d'une source éolienne avec stockage couplée à un bus HVDC 137

Sommaire du chapitre IV 137
Table des figures du chapitre IV 139

1. INTRODUCTION 141
2. LA CONVERSION DC/DC -GENERALITES 143
3. LA CONVERSION DC/DC POUR LA CHAINE EOLIENNE 144
4. LE STOCKAGE D'ENERGIE-GENERALITES 147
 - 4.1. Techniques de stockage à long terme 148
 - 4.2. Techniques de stockage à court terme 150
 - 4.3. Présentation résumée des technologies de stockage de l'énergie 151
 - 4.4. La batterie au plomb 152
 - 4.5. Les Super-condensateurs 159
 - 4.6. Avantages et inconvénients des super-condensateurs et batteries 163
5. LE STOCKAGE D'ENERGIE POUR LA CHAINE EOLIENNE 164
 - 5.1. Principe généraux de la modélisation du stockage 164
 - 5.2. Modélisation du stockage par batteries 165
 - 5.3. Modélisation du stockage par super-condensateur 165
 - 5.4. Modélisation de la partie contrôle des convertisseurs de la partie stockage ... 166
6. LE SYSTÈME DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE AVEC STOCKAGE CONNECTÉ AU BUS HVDC 168

6.1.	Modèle Matlab/Simulink du système complet eolien + stockage.....	168
6.2.	réponse du système pour une vitesse de vent fixée à 12 m/s. Etude statique.	170
6.3.	réponse du système pour Un profil de vent monotone croissant de façon discrète. Etude dynamique.	174
6.4.	réponse du système pour Un profil de vent VARIABLE DE façon continue et aléatoire.	179
7.	CONCLUSION	186
8.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE DU CHAPITRE IV	187

Conclusion générale et Perspectives 191

Table générale des Figures 199

Table des Matières..... 203

Liste des publications.....207

Annexe..... 211

Liste des publications associées à ce travail

FZ Naama, A Zegaoui, Y Benyessad, FZ Kessaissia, A Djahbar, M Aillerie, Model and Simulation of a Wind Turbine and its Associated Permanent Magnet Synchronous Generator, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES18, 19–21 September 2018, Athens, Greece.

FZ Naama, A Zegaoui, Y Benyessad, FZ Kessaissia, A Djahbar, M Aillerie, Model and Simulation of a Wind Turbine and its Associated Permanent Magnet Synchronous Generator, Energy Procedia 157, 737-745, 2019.

FZ Naama, M Aillerie, Z Zheng, A Zegaoui, A Djahbar, Modeling and Simulation of a SWT and its Associated Permanent Magnet Synchronoius Generator, Micro-grid Summer University Belfort, 2019.

M Aillerie, J Zaraket, R Belghouthi, **FZ Naama**, H Christelle, Z Carine, Renewable energy generation platforms based on photovoltaic panels/wind turbines/storage systems, TMREES19-Spring Meeting. International Conference Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 2019.

FZ Naama, A Zegaoui, A Djahbar, M Aillerie, Simulation and modeling of a small permanent magnet synchronous generator wind turbine directly from its datasheet, Przegląd Elektrotechniczny 1 (7), 10-14, 2020.

Annexe.

**Fiche technique éolienne
Anelion SW 3.5-GT**



- Conçue et fabriquée par Anelion.
- Grande robustesse des composants et des équipements.
- Sans entretien.
- Rendement énergétique élevé.
- Système autonome ou raccordé au réseau.
- Faible niveau d'émissions sonores.
- Système de freinage électronique actif.
- Système redondant de sécurité passive électrique/mécanique.
- Contrôle rigoureux de la qualité de l'éolienne et de tous ses composants.
- Conformité à la norme IEC 61400-2.

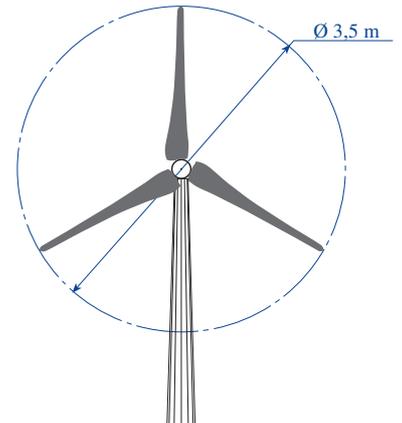


- Poursuivant une politique d'entreprise visant à toujours proposer des produits de qualité supérieure et d'une extrême fiabilité, nous avons mis au point une éolienne basée sur un concept innovant et une technologie d'avant-garde.
- Le système d'orientation passif face au vent et la turbine à pas fixe de cette éolienne en font un système robuste qui ne nécessite que peu d'entretien.

- Notre engagement à établir une relation de collaboration étroite avec nos clients, en leur offrant une assistance et une formation en continu de haut niveau, est l'un des plus grands défis que Anelion a su relever dans ce projet.
- Que ce soit à partir de votre résidence ou de vos locaux professionnels, transformez le vent en énergie électrique pour créer un monde plus durable.

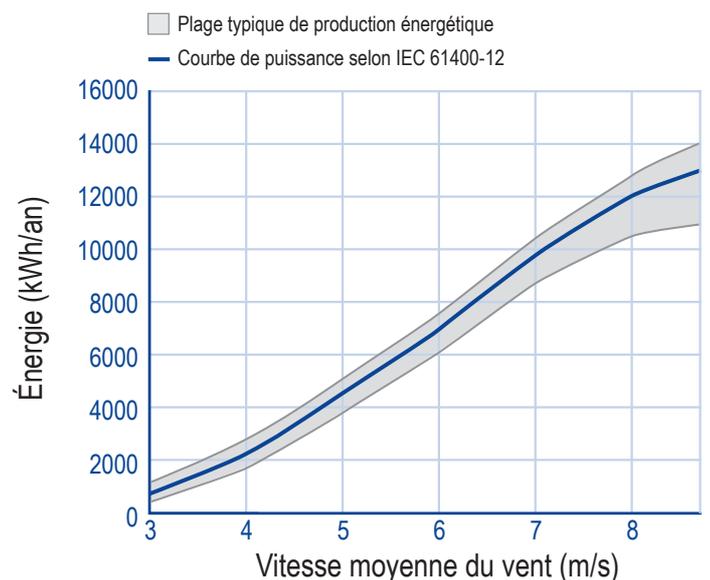
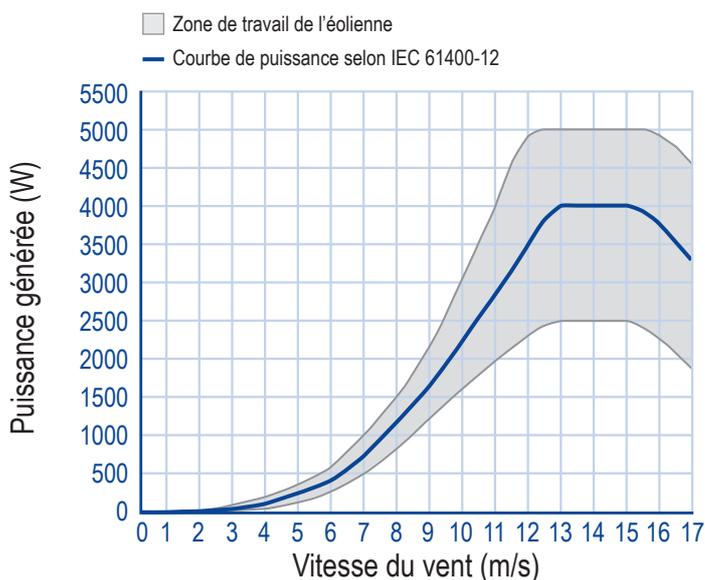
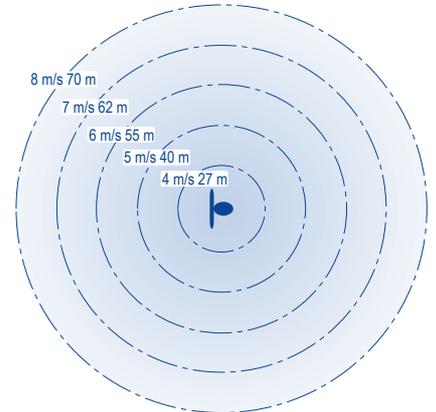
Caractéristiques techniques

Puissance maximale (W)	5000		
Puissance à vent 12 m/s (W)	3500		
Poids (kg)	125		
Diamètre du rotor (m)	3,5		
Surface de balayage (m ²)	9,62		
Configuration du rotor	3 pales sous le vent		
Pales	Epoxi renforcé à la fibre de verre		
Plage de vitesse (tr/m)	100-465		
Type de générateur	Direct Drive PMSG		
Contrôle d'orientation	Passif		
Contrôle de puissance	Suivi de courbe de puissance maximale		
Onduleur de connexion au réseau	SMA / Ingeteam / Delta (5kW)		
Type d'onduleur	Monophasé pour injection sur le réseau		
Système de freinage	Système de freinage électronique actif et système redondant de sécurité passive électrique/mécanique		
Vitesse de vent de démarrage (m/s)	3,5		
Vitesse de vent de coupure (m/s)	17,5		
Vitesse de vent extrême (m/s)	60		
LES VALEURS MAXIMALES	Aérogénérateur	Tension (Vrms)	400
		Intensité (Arms)	20
	Onduleur	Tension (Vrms)	280
		Intensité (Arms)	22
Garantie (années)	5		



Émissions sonores

Anneaux de 40 dB (A) compte tenu d'un mât d'une hauteur de 10 m et d'une vitesse moyenne du vent annuel de l'emplacement.



CAPENERGIE France
Mas d'alhem
34150 - La Boissière
France

CAP ENERGIE UK Ltd
32 Hanger Hill
Weybridge
Surrey KT13 9YD
UK

Courbes obtenues selon IEC 61400-12

+33 (0)4 67 56 77 91
info@capenergie.fr
www.capenergie.fr

+44 (0)1932 821 178
info@capenergie.co.uk
www.capenergie.co.uk