



École Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Thèse

de Doctorat en Sciences

Spécialité : Automatique

Présentée par :
BOUSSIALA Boubakr
Magister en Électrotechnique, ENP

Thème

Commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents pour des applications de soudage à l'arc

Thèse soutenue publiquement le 14/04/2019, devant le Jury d'examen suivant :

<i>Président :</i>	MEKHALDI Abdelouahab	Professeur	ENP
<i>Directeurs de thèse :</i>	MAHMOUDI Mohand Oulhadj	Professeur	ENP
	NEZLI Lazhari	Professeur	ENP
<i>Examineurs :</i>	- KAABECHE Abdelhamid	MR. CDER	
	- LARABI Abdelkader	Professeur	USTHB
	- MOUALDIA Abdelhafid	MC. A. Univ. YF, Médéa	
	- BOUDANA Djamel	MC. A.	ENP

ENP 2019



École Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Thèse

de Doctorat en Sciences

Spécialité : Automatique

Présentée par :
BOUSSIALA Boubakr
Magister en Électrotechnique, ENP

Thème

Commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents pour des applications de soudage à l'arc

Thèse soutenue publiquement le 14/04/2019, devant le Jury d'examen suivant :

<i>Président :</i>	MEKHALDI Abdelouahab	Professeur	ENP
<i>Directeurs de thèse :</i>	MAHMOUDI Mohand Oulhadj	Professeur	ENP
	NEZLI Lazhari	Professeur	ENP
<i>Examineurs :</i>	- KAABECHE Abdelhamid	MR. CDER	
	- LARABI Abdelkader	Professeur	USTHB
	- MOUALDIA Abdelhafid	MC. A.	Univ. YF, Médéa
	- BOUDANA Djamel	MC. A.	ENP

ENP 2019



الحمد لله الذي وفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع، فالحمد والشكر لله أولاً وآخراً

L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire de Commande des Processus (LCP) de l'École Nationale Polytechnique, sous la direction des Professeurs Mohand Oulhadj MAHMOUDI, et Lazhari NEZLI. Je tiens à leurs exprimer mes plus vifs remerciements et ma profonde et respectueuse reconnaissance pour leurs suivis, compétences, disponibilités et encouragements ; ainsi que leurs conseils avisés tout au long du déroulement de ce travail.

Ma profonde gratitude à Monsieur Abdelouahab MEKHALDI, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, pour l'intérêt et le soutien chaleureux dont il a toujours fait preuve.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Abdelhamid KAABECHE, maitre de recherche au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), Monsieur Abdelkader LARABI, Professeur à l'Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene (USTHB), Monsieur Abdelhafid MOUALDIA, Maitre de conférences à l'Université Yahia Feres de Médéa, et Monsieur Djamel BOUDANA, Maitre de conférences à l'École Nationale Polytechnique, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir accepté de participer à mon jury.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à tous mes enseignants de l'École Nationale Polytechnique ; et mes remerciements vont aussi à mes très chers parents, à ma femme et mes enfants.

Bonne lecture !!

Dédicaces

- *A ma très chère mère,*
 - *A mon très cher père,*
 - *A ma très chère femme,*
 - *A mes très chers petits-enfants Ines et Abdellah*
 - *A mes frères*
 - *A mes beaux-parents*
 - *A mes beaux-frères*
- *A tous mes amis*

Je dédie ce modeste travail

ملخص:

تتطلب أنشطة التلحيم في المناطق المنعزلة عن الشبكة الكهربائية للتوزيع، بشكل عام إلى ماكنة تلحيم مزودة بمولد ديزل لإنتاج الكهرباء (تسمى مولد ديزل للتلحيم). إلا أن هذه الماكنة تثير العديد من المشاكل، مثل تكاليف الوقود و نقله، الصيانة، الضوضاء، التلوث ومدة الحياة القصيرة. في هذه الأطروحة، أجرينا دراسة معمقة حول جدوى استبدال مولد الديزل بنظام الرياح. إن حلا كهذا يمكنه تلبية احتياجات الطاقة بشكل أفضل من الديزل، و هذا بسبب تكلفته المنخفضة مقارنة بالديزل، علاوة على ذلك أن طاقة الرياح نظيفة، متجددة وبيئية. هذا الحل يساهم أيضا في تنوع موارد الطاقة وتعزيز تطوير الطاقات المتجددة في المناطق المنعزلة. لهذا قمنا بتصميم نظام تلحيم، يتغذى كهربائيا عن طريق عنفة رياح صغيرة الحجم، متغيرة السرعة مع مولد متزامن ذو مغناطيس دائمة (م.م.د.). كما أنه تم حل مشكلة التقلب في إنتاج الكهرباء بإضافة بطاريات تخزين، و طابق لتعقب الاستطاعة القصوى (ت.ن.إ.ق) مصحوب بمنظم مناسب، ونظام لضبط زاوية ريشات العنفة، وأخيرا نظام تبريد للطاقة و الذي ينشط في حالة ما كان هناك فائض في الإنتاج. من جانب اللحام، اخترنا محولاً ذو هندسة الجسر الكامل لتوفير تيار التلحيم. تم تصميم النظام المقترح ومحاكاته ببرنامج الماتلاب/سيميلانك لمعاينة كيفية عمله. قد أظهرت نتائج المحاكاة أن نظام التلحيم المصمم بعنفة يمكن أن يوفر تياراً مستقرًا للحام، حتى في ظل الظروف المتغيرة لمقاومة قوس التلحيم وسرعة الرياح. كما أثبتت نتائج المحاكاة قابلية تحقيق النظام على أرض الواقع.

الكلمات الدالة: عنفة الرياح، م.م.د، محطة لحام، اللحام بالقوس، مولد اللحام، ت.ن.إ.ق، مولد الديزل، محول، جسر كامل

Abstract :

Welding activities at remote sites without electrical distribution grid, generally require a welding machine equipped with a diesel generator to produce electricity (called welding genset). However, this machine present many problems, namely, cost and transportation of the fuel, maintenance, noise, pollution and short life. In this thesis, a detailed study was made on the feasibility for replacing the diesel generator by a wind turbine. This solution can meet energy needs better than diesel, because of its low cost compared to diesel, clean, renewable and environmental. Such a solution also proposed to diversify energy resources and to promote the development of renewable energies in remote sites. So, we have designed a welding system based on a small variable-speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) wind turbine. The problem of fluctuation of the production has been solved by the addition of storage batteries, a stage to track the maximum power (MPPT) accompanied by an appropriate regulator, a system of regulation of the pitch angle blades, and finally a dump system that will be activated in case of excess production. For the welding side, we opted for the full-bridge topology inverter to supply the arc current. The proposed system was built and simulated in Matlab/Simulink to test how it works. The simulation results show that the proposed system based on a wind turbine can provide a stable welding current, even under varying conditions of arc resistance and wind speed. The simulation results also prove the feasibility and efficiency of the proposed system.

Keywords: Wind Turbine, PMSG, Welding machine, Arc welding, MPPT, Diesel genset, Inverter, Full-bridge.

Résumé :

Les activités de soudage dans les sites isolés sans accès au réseau électrique de distribution généralement exigent un poste à souder équipé d'un groupe électrogène diesel pour produire de l'électricité (appelé groupe de soudage). Or que cet équipement pose beaucoup de problèmes à savoir, le coût et le transport du carburant, la maintenance, le bruit, la pollution et la courte durée de vie. Dans cette thèse, une étude approfondie a été faite sur la faisabilité du remplacement du groupe diesel par un système éolien. Cette solution peut répondre aux besoins énergétiques mieux que le diesel, en raison de son faible coût par rapport au diesel, sa propriété

et renouvelabilité. Une telle solution permet également de diversifier les ressources énergétiques et de promouvoir le développement des énergies renouvelables dans les sites isolés. En effet, nous avons pu concevoir un système de soudage basé sur une petite éolienne à vitesse variable à entraînement direct à la génératrice synchrone à aimants permanents (*GSAP*). Le problème de fluctuation de la production éolienne a été résolu par l'ajout des batteries de stockage, d'un étage de poursuite de la puissance maximale (*MPPT*) accompagné d'un régulateur approprié, d'un système de régulation de l'angle de calage, et enfin un système de dissipation d'énergie qui s'activera en cas d'un surplus de production. Du côté soudage, nous avons opté pour l'onduleur à topologie du pont complet (*Full-bridge*) pour fournir le courant de l'arc. Le système proposé a été modélisé et simulé sous Matlab/Simulink pour examiner son fonctionnement. Les résultats de la simulation montrent que le système conçu à base d'une éolienne peut fournir un courant de soudage stable, même dans des conditions variables de la résistance de l'arc et la vitesse du vent. Les résultats de la simulation prouvent également la faisabilité et l'efficacité du système proposé.

Mots clés : Éolienne, GSAP, Poste à souder, Arc de soudage, Générateur de soudage, MPPT, Groupe diesel, Onduleur, Full-bridge.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations et Abréviations

Introduction générale 14

I Système de Conversion d'Énergie Éolienne 17

I.1 Introduction..... 17

I.2 Développement des énergies renouvelables en Algérie..... 19

I.3 Gisement éolien en Algérie 21

I.4 Capteurs éoliens 22

I.4.1 Caractéristiques du vent 23

I.5 Classement des Turbines Éoliennes 24

I.5.1 Éoliennes à axe vertical..... 24

a) Rotor de Savonius 24

b) Rotor de Darrieus..... 24

I.5.2 Éoliennes à axe horizontal 25

I.6 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes 25

I.7 Constitution d'une éolienne 26

I.8 Conversion aérodynamique 27

I.9 Conception des éoliennes 28

I.9.1 Éolienne à vitesse fixe 28

I.9.2 Éolienne à vitesse variable 29

I.9.3 Éolienne à vitesse variable avec un générateur multi-pôles..... 29

I.9.4 Éolienne à vitesse variable limitée 30

I.9.5 Autres types de générateurs pour les petites éoliennes 30

I.10 Régulation mécanique 31

I.10.1 Régulation par l'angle de calage (pitch angle control)..... 31

I.10.2 Régulation par l'angle fixe (passive stall control) 31

I.10.3 Régulation Stall Active 32

I.11 Besoins des systèmes éoliens à petite taille 32

I.12 Configurations des systèmes éoliens autonomes 33

I.13 Conclusion 34

II Générateurs de Soudage à l'arc 35

II.1 Introduction..... 35

II.2 Soudage à l'arc..... 36

II.3 Procédés de soudage à l'arc 37

II.3.1 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)..... 37

II.3.2 Soudage à l'arc avec électrode réfractaire (TIG)..... 38

II.3.3 Soudage à l'arc semi-automatique (GMAW) 39

II.4 Paramètres électriques influençant sur la soudure..... 39

II.4.1	Tension de l'arc	39
II.4.2	Tension en circuit ouvert	40
II.4.3	Courant de soudage	40
II.4.4	Polarité de l'électrode	41
II.5	Caractéristiques (U-I) de l'arc de soudage	41
II.6	Caractéristiques (U-I) des générateurs de soudage	42
II.6.1	Caractéristiques (U-I) statiques	43
a)	Caractéristiques (U-I) à courant constant	43
b)	Caractéristiques (U-I) à tension constante	43
II.6.2	Caractéristique (U-I) dynamique	44
II.7	Classification des générateurs de soudage à l'arc	44
II.7.1	Générateurs de soudage statiques	46
a)	Transformateur de soudage	46
b)	Redresseur de soudage	47
c)	Onduleur de soudage	47
II.7.2	Générateurs de soudage rotatifs	48
a)	Génératrices de soudage	48
b)	Groupe électrogène de soudage	49
II.8	Typologies des onduleurs de soudage	50
II.9	Étude de cas (Onduleur de soudage Half-Bridge)	52
II.9.1	Les équations de la tension de l'arc	53
II.9.2	Résultats de simulation	55
II.10	Conclusion	57
III	Étude et modélisation de la chaîne éolienne à base de GSAP	58
III.1	Introduction	58
III.2	Énergie cinétique du vent	58
III.3	Conversion aérodynamique	59
III.3.1	Vitesse spécifique (Tip Speed Ratio)	59
III.3.2	Coefficient de puissance	59
III.4	Modélisation de la chaîne éolienne	61
III.4.1	Modélisation du vent	62
III.4.2	Modèle de la turbine	63
III.4.3	Modélisation de la Génératrice Synchrones à Aimants Permanents	64
a)	Machine Synchrones à Aimants Permanents montés en surface	64
b)	Machine Synchrones à Aimants Permanents à pôles saillants	65
III.4.4	Équations de la Génératrice Synchrones à Aimants Permanents	65
a)	Équation des tensions :	65
b)	Équation des Flux :	65
c)	Équations de la GSAP dans le repère (d,q)	66
d)	Équation des tensions dans le repère (d,q)	67
e)	Équation des Flux dans le repère (d,q)	68
f)	Couple électromagnétique	69
III.4.5	Modèle de l'ensemble Turbine - GSAP	70
III.5	Contrôle de la puissance produite	72
III.5.1	Système d'orientation des pales	73
III.5.2	Maximisation de la puissance produite	74
a)	Algorithme TSR	74
III.6	Résultats de simulation	76
III.6.1	Résultats pour l'optimisation de la puissance	76

III.6.2 Résultats pour la limitation de puissance	79
III.7 Conclusion	82
IV Conception d'un générateur de Soudage à base d'une petite éolienne à GSAP.....	83
IV.1 Introduction.....	83
IV.2 Description du générateur de soudage proposé	84
IV.3 Éolienne à GSAP.....	84
IV.3.1 Stratégie de MPPT	84
IV.3.2 Stratégie de limitation de puissance.....	85
IV.4 Onduleur de soudage.....	85
IV.4.1 Régulation du courant de l'arc :.....	87
IV.5 Batterie de stockage:	87
IV.5.1 Modélisation de Batteries de stockage:.....	87
a) Modèle de la capacité	88
b) Équation de la tension en décharge	88
c) Équation de la tension en charge.....	89
IV.6 Gestion des énergies.....	89
IV.7 Contrôle de la tension du bus continu	91
IV.8 Analyse des résultats de la simulation.....	92
IV.8.1 Simulation avec vent fort.....	92
IV.8.2 Simulation avec vent très faible.....	95
IV.9 Conclusion	97
Discussion	98
Conclusion générale.....	100
Références	102
Annexe.....	107

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DEVELOPPEMENT DE LA CAPACITE D'EOLIENNE ENTRE 1985 ET 2018	17
TABLEAU 2. CENTRALES DE TYPE RENOUVELABLES (ENR) INSTALLEES EN ALGERIE.....	20
TABLEAU 3. COEFFICIENTS DE LA CARACTERISTIQUE DE COEFFICIENT DE PUISSANCE	60

LISTE DES FIGURES

FIG. 1. POSTE A SOUDER A L'ARC A BASE D'UN GROUPE DIESEL	16
FIG. 2. ILLUSTRATION D'UN POSTE DE SOUDAGE A L'ARC A BASE D'UNE EOLIENNE.....	17
FIG. I. 1. CAPACITE ANNUELLE INSTALLEE ENTRE 2001-2017	18
FIG. I. 2. CAPACITE GLOBALE INSTALLEE CUMULEE ENTRE 2001-2017	18
FIG. I. 3. CAPACITE TOTALE ET NOMBRE TOTAL DES EOLIENNES PETITES PUISSANCE INSTALLEES DANS LE MONDE	18
FIG. I. 4. NOMBRE TOTAL DES EOLIENNES DE PETITE PUISSANCE INSTALLEES PAR PAYS	19
FIG. I. 5. LOCALISATION DES CENTRALES ENR EN ALGERIE	20
FIG. I. 6. PHOTOS DE QUELQUES CENTRALES DE TYPES ENR INSTALLEES EN ALGERIE.....	21
FIG. I. 7. CARTE ANNUELLE DES VENTS A 10M DU SOL (M/S)	22
FIG. I. 8. PHASES DE CONVERSION ENERGETIQUE D'UNE EOLIENNE.....	22
FIG. I. 9. VARIATIONS TEMPORELLES DE LA VITESSE DU VENT	23
FIG. I. 10. (A) DISTRIBUTION DE WEIBULL, (B) LES MOYENNES MENSUELLES DES VITESSES POUR LE SITE DE HASSI R'MEL (ALGERIE)	24
FIG. I. 11. ÉOLIENNES A AXE VERTICAL	25
FIG. I. 12. ÉOLIENNES A AXE HORIZONTAL	25
FIG. I. 13. COEFFICIENT DE PUISSANCE DE DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES	26
FIG. I. 14. LES ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE EOLIENNE	27
FIG. I. 15. EFFORTS SUR UN PROFIL AERODYNAMIQUE D'UNE PALE	28
FIG. I. 16. CONCEPTION D'UNE EOLIENNE A VITESSE FIXE	29
FIG. I. 17. CONCEPTION D'UNE EOLIENNE A VITESSE VARIABLE	29
FIG. I. 18. CONCEPTION D'UNE EOLIENNE A VITESSE VARIABLE A ENTRAINEMENT DIRECT.....	30
FIG. I. 19. CONCEPTION D'UNE EOLIENNE A VITESSE VARIABLE LIMITEE	30
FIG. I. 20. REGULATION MECANIQUE PAR L'ANGLE DE CALAGE	31
FIG. I. 21. REGULATION MECANIQUE PAR STALL	32
FIG. I. 22. CARACTERISTIQUE DE PUISSANCE POUR DIFFERENTS TYPE DE CONTROLE	32
FIG. I. 23. SYSTEME EOLIEN AUTONOME A BASE D'UN REDRESSEUR COMMANDE	33
FIG. I. 24. SYSTEME EOLIEN AUTONOME A BASE D'UN REDRESSEUR NON COMMANDE.....	34
FIG. I. 25. SYSTEME EOLIEN AUTONOME A BASE D'UN HACHEUR	34
FIG. II. 1. NACELLE DE PETITE EOLIENNE REALISEE PAR DES SOUDURES A L'ARC	35
FIG. II. 2. PRINCIPE DE LA SOUDURE A L'ARC ELECTRIQUE.....	36
FIG. II. 3. CIRCUIT ELECTRIQUE D'UN PROCEDE DE SOUDAGE	37
FIG. II. 4. SCHEMA DE PRINCIPE DU SOUDAGE MANUEL AVEC ELECTRODE ENROBEE.....	38
FIG. II. 5. SCHEMA DE PRINCIPE DU SOUDAGE TIG	38
FIG. II. 6. SCHEMA DE PRINCIPE DU SOUDAGE MIG/MAG.....	39
FIG. II. 7. INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE L'ARC SUR LA TENSION DE L'ARC.....	40
FIG. II. 8. PROFONDEUR DE PENETRATION POUR QUELQUES COURANTS DE SOUDAGE	41
FIG. II. 9. INFLUENCE DE LA POLARITE SUR LA PENETRATION DE LA SOUDURE.....	41
FIG. II. 10. CARACTERISTIQUE (U-I) DE L'ARC DE SOUDAGE POUR DIFFERENTES LONGUEURS D'ARC	42
FIG. II. 11. CARACTERISTIQUE D'UN GENERATEUR A COURANT CONSTANT	43
FIG. II. 12. CARACTERISTIQUE D'UN GENERATEUR A TENSION CONSTANTE	44
FIG. II. 13. CLASSIFICATION DES GENERATEURS DE SOUDAGE A L'ARC	45
FIG. II. 14. HISTORIQUE DES DIFFERENTES CONCEPTIONS DES GENERATEURS DE SOUDAGE A L'ARC.....	46
FIG. II. 15. GENERATEUR DE SOUDAGE A TRANSFORMATEUR.....	46
FIG. II. 16. GENERATEUR DE SOUDAGE A REDRESSEUR.....	47
FIG. II. 17. GENERATEUR DE SOUDAGE DE TYPE ONDULEUR.....	47
FIG. II. 18. DIAGRAMME D'UN GENERATEUR DE SOUDAGE DE TYPE ONDULEUR	48
FIG. II. 19. DIAGRAMME D'UNE GENERATRICE DE SOUDAGE.....	48
FIG. II. 20. GENERATEUR DE SOUDAGE A BASE D'UNE GENERATRICE DC	49
FIG. II. 21. GENERATEUR DE SOUDAGE A BASE DE GROUPE ELECTROGENE.....	49

FIG. II. 22. DIAGRAMME DE GROUPE ELECTROGENE DE SOUDAGE	50
FIG. II. 23. ONDULEUR DE SOUDAGE A BASE DE LA TOPOLOGIE PUSH-PULL.....	50
FIG. II. 24. ONDULEUR DE SOUDAGE A BASE DE LA TOPOLOGIE FULL-BRIDGE.....	51
FIG. II. 25. ONDULEUR DE SOUDAGE A TOPOLOGIE FLYBACK.....	51
FIG. II. 26. ONDULEUR DE SOUDAGE A TOPOLOGIE HALF-BRIDGE	52
FIG. II. 27. ONDULEUR DE SOUDAGE A TOPOLOGIE FORWARD.....	52
FIG. II. 28. ONDULEUR DE SOUDAGE HALF-BRIDGE	53
FIG. II. 29. BLOC DIAGRAMME DE LA CHAINE DE REGULATION.....	53
FIG. II. 30. LES PHASES DE COMMUTATION DE L'ONDULEUR HALF-BRIDGE	55
FIG. II. 31. TENSION ET COURANT DE L'ARC.....	55
FIG. II. 32. RESULTATS DE SIMULATION AVEC $R=0.1\Omega$, $\Delta R=0\%$, (B) EST LA VALEUR MOYENNE DE LA TENSION DE SOUDAGE.....	56
FIG. II. 33. RESULTATS DE SIMULATION AVEC $R=0.1\Omega$, $\Delta R=30\%$, (B) EST LA VALEUR MOYENNE DE LA TENSION DE SOUDAGE.....	57
FIG. III. 1. COLONNE D'AIR EN DEPLACEMENT	58
FIG. III. 2. (A) COEFFICIENT DE PUISSANCE ET (B) COEFFICIENT DE COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE SPECIFIQUE ET L'ANGLE DE CALAGE	60
FIG. III. 3. PUISSANCE EXTRAITE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION POUR PLUSIEURS VITESSES DU VENT	61
FIG. III. 4. MODELE MATHEMATIQUE DE LA VITESSE DU VENT	62
FIG. III. 5. PROFIL DE VITESSE DU VENT: (A) FORTE TURBULENCE (B) MOYENNE TURBULENCE.....	63
FIG. III. 6. MODELE DE LA TURBINE EOLIENNE	64
FIG. III. 7. GSAP: (A DROITE) AIMANTS MONTS EN SURFACE, (A GAUCHE) POLES SAILLANTS.....	64
FIG. III. 8. REPRESENTATION DE LA GSAP DANS LE REPERE ABC.....	66
FIG. III. 9. REPRESENTATION DE LA GSAP DANS LE REPERE DQ.....	67
FIG. III. 10. REPRESENTATION DE LA GSAP DANS LE REPERE DQ AVEC LES HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.....	69
FIG. III. 11. CIRCUITS EQUIVALENTS DE LA GSAP	69
FIG. III. 12. SCHEMA DU SYSTEME TURBINE-GSAP	70
FIG. III. 13. (A) PUISSANCE PRODUITE PAR LA GSAP (B) ET LA VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE POUR UNE CHARGE RESISTIVE DE 100Ω ET UNE VITESSE DU VENT DE 12 M/S.....	71
FIG. III. 14. (A) TENSION COMPOSEE DE LA GSAP (B) AVEC UN ZOOM AU DEMARRAGE POUR UNE CHARGE RESISTIVE DE 100Ω ET UNE VITESSE DU VENT DE 12 M/S.....	71
FIG. III. 15. (A) TENSION REDRESSEE, (B) ET COURANT REDRESSE PAR LE PONT DP3 POUR UNE CHARGE RESISTIVE DE 100Ω ET UNE VITESSE DU VENT DE 12 M/S	71
FIG. III. 16. (A) COEFFICIENT DE PUISSANCE, (B) ET L'ANGLE DE CALAGE POUR UNE CHARGE RESISTIVE DE 100Ω ET UNE VITESSE DU VENT DE 12 M/S	72
FIG. III. 17. PUISSANCE PRODUITE D'UNE EOLIENNE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT.....	72
FIG. III. 18. REGULATION DE L'ANGLE DE CALAGE DES PALES	73
FIG. III. 19. ANGLE DE CALAGE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE.....	74
FIG. III. 20. COURBES DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION	75
FIG. III. 21. ALGORITHME TSR UTILISEE POUR L'OPTIMISATION DE LA PUISSANCE	76
FIG. III. 22. CIRCUIT DE COMMANDE DE MPPT ET DE L'ANGLE DE CALAGE	76
FIG. III. 23. PROFIL DE LA VITESSE DU VENT APPLIQUE.....	77
FIG. III. 24. VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE-GSAP	77
FIG. III. 25. COEFFICIENT DE PUISSANCE DE LA TURBINE.....	77
FIG. III. 26. ANGLE DE CALAGE DES PALES DE LA TURBINE	78
FIG. III. 27. PUISSANCE ACTIVE PRODUITE PAR LA GSAP.....	78
FIG. III. 28. PUISSANCE ACTIVE PRODUITE PAR LA GSAP EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION.....	78
FIG. III. 29. (A) TENSION ET (B) COURANT DE LA GSAP.....	79
FIG. III. 30. (A) TENSION ET (B) COURANT APRES REDRESSEMENT	79
FIG. III. 31. PROFIL DE VITESSE DU VENT APPLIQUE.....	80
FIG. III. 32. VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE - GSAP	80
FIG. III. 33. COEFFICIENT DE PUISSANCE DE LA TURBINE.....	80
FIG. III. 34. ANGLE DE CALAGE DES PALES DE LA TURBINE	80
FIG. III. 35. PUISSANCE ACTIVE PRODUITE PAR LA GSAP.....	81
FIG. III. 36. PUISSANCE ACTIVE PRODUITE PAR LA GSAP EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION.....	81
FIG. III. 37. (A) TENSION ET (B) COURANT DE LA GSAP.....	81
FIG. III. 38. (A) TENSION ET (B) COURANT DE LA GSAP APRES REDRESSEMENT.....	82
FIG. IV. 1. SCHEMA GLOBAL DU GENERATEUR DE SOUDAGE BASE SUR UNE EOLIENNE A GSAP	84
FIG. IV. 2. TOPOLOGIE D'ONDULEUR ADOPTEE POUR LE GENERATEUR DE SOUDAGE PROPOSE	85
FIG. IV. 3. FORMES D'ONDE DU COURANT ET TENSION D'ARC	86

FIG. IV. 4. DIAGRAMME DE LA REGULATION DU COURANT DE SOUDAGE	87
FIG. IV. 5. SCHEMA EQUIVALENT DE LA BATTERIE	88
FIG. IV. 6. STRUCTURE DE LA GESTION D'ENERGIE	89
FIG. IV. 7. ORGANIGRAMME DE LA GESTION D'ENERGIE	90
FIG. IV. 8. SYSTEME DE CHARGE/DECHARGE DE LA BATTERIE ET DE DISSIPATION D'ENERGIE.....	91
FIG. IV. 9. SCHEMA DE CONTROL DE LA TENSION VDC, DE CHARGE/DECHARGE DE LA BATTERIE ET DE DISSIPATION D'ENERGIE	92
FIG. IV. 10. PROFIL DE LA VITESSE DU VENT APPLIQUE	92
FIG. IV. 11. VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE AVEC MPPT	92
FIG. IV. 12. COURANT DE L'ARC DURANT LA PROCEDURE DE SOUDAGE	93
FIG. IV. 13. TENSION DE L'ARC DURANT LA PROCEDURE DE SOUDAGE	93
FIG. IV. 14. COEFFICIENT DE PUISSANCE AVEC REGULATION MPPT	93
FIG. IV. 15. ANGLE DE CALAGE DES PALES DE LA TURBINE	93
FIG. IV. 16. GESTION DE PUISSANCES : DE L'ÉOLIENNE, BATTERIE ET DE L'ARC.....	94
FIG. IV. 17. PUISSANCE PRODUITE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE	94
FIG. IV. 18. TENSION DU BUS DC AU COURS DE LA PROCEDURE DE SOUDAGE.....	94
FIG. IV. 19. ÉTAT DE CHARGE DE LA BATTERIE DURANT LA PROCEDURE DE SOUDAGE	94
FIG. IV. 20. TENSION DE LA GSAP EN VALEUR EFFICACE DURANT LA PRODUCTION EOLIENNE	95
FIG. IV. 21. COURANT DE LA GSAP EN VALEUR EFFICACE DURANT LA PRODUCTION EOLIENNE	95
FIG. IV. 22. PROFIL DE LA VITESSE DU VENT APPLIQUE	95
FIG. IV. 23. VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE AVEC MPPT	95
FIG. IV. 24. COURANT DE L'ARC DURANT LA PROCEDURE DE SOUDAGE	96
FIG. IV. 25. TENSION DE L'ARC DURANT LA PROCEDURE DE SOUDAGE	96
FIG. IV. 26. COEFFICIENT DE PUISSANCE AVEC REGULATION MPPT	96
FIG. IV. 27. ANGLE DE CALAGE DES PALES DE LA TURBINE	96
FIG. IV. 28. GESTION DE PUISSANCES : DE L'ÉOLIENNE, BATTERIE ET DE L'ARC.....	96
FIG. IV. 29. PUISSANCE PRODUITE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE	96
FIG. IV. 30. TENSION DU BUS DC AU COURS DE LA PROCEDURE DE SOUDAGE.....	97
FIG. IV. 31. ÉTAT DE CHARGE DE LA BATTERIE DURANT LA PROCEDURE DE SOUDAGE	97
FIG. IV. 32. TENSION DE LA GSAP EN VALEUR EFFICACE DURANT LA PRODUCTION EOLIENNE	97
FIG. IV. 33. COURANT DE LA GSAP EN VALEUR EFFICACE DURANT LA PRODUCTION EOLIENNE	97

NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

$GSAP$	Génératrice synchrone à aimants permanents
s	Opérateur de LAPLACE
v	Vitesse du vent
$f(v)$	Distribution de Weibull
k	Facteur d'échelle de Weibull
c	Facteur de forme de Weibull
F_L	Force de portance
F_D	Force de trainée
C_L	Coefficient de portance
C_D	Coefficient de trainée
V_{arc}	Tension de l'arc de soudage
i_{arc}	Courant de l'arc de soudage
l_a	Longueur de l'arc
R_a	La résistance de l'arc
LS	L'inductance de lissage du courant de soudage
N_p	Nombre de paires de pôles
f	Coefficient des frottements visqueux totaux de la turbine-GSAP
$P(\theta)$	Matrice de la transformation de PARK
P_{air}	Puissance du vent
P_m	Puissance éolienne produite
S	Surface balayée par les pales de la turbine
R	Rayon de la turbine
J	Inertie totale de la turbine-GSAP
ρ	Densité de l'air
λ	Vitesse spécifique de la turbine
C_p	Coefficient de puissance
β	Angle de calage des pales
ω_m	Vitesse angulaire de turbine-GSAP
$\phi_a, \phi_b, \phi_c,$	Flux statoriques de la GSAP
$v_a, v_b, v_c,$	Tensions statoriques de la GSAP
$i_a, i_b, i_c,$	Courants statoriques de la GSAP
R_s	Résistance statorique de la GSAP
L_s	Inductance statorique
M_s	Inductance mutuelle statorique
L_d	Inductance statorique direct
L_q	Inductance statorique en quadrature
ϕ_d, ϕ_q	Flux direct et en quadrature statoriques

i_{ds}, i_{qs}	Courant direct et en quadrature statoriques
ϕ_r	Flux permanent rotorique
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale de la turbine
θ_s	Abscisse angulaire du référentiel de Park
T_e	Couple électromagnétique
T_m	Couple de la turbine
C	Capacité de la batterie
C_{10}	Capacité de la batterie avec décharge en 10 heures
I_{10}	Courant de décharge de la batterie en 10 heures
EDC	État de charge de la batterie
V_d	Tension de décharge de la batterie
V_c	Tension de charge de la batterie
Φ_v	Fonction de transfert du filtre de Von Karman
T_v	Constante de temps du filtre Von Karman
L_v	Échelle de longueur de la turbulence
K_σ	Coefficient de l'intensité de la turbulence
K_v	Gain du filtre de Von Karman
σ_v	Écart type de la turbulence
v_t	Composante représentant la turbulence du vent
MLI	Modulation de largeur d'Impulsion
$MPPT$	Maximum Power Point Tracking
TSR	Tip Speed Ratio
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
DC	Direct Current
AC	Alternative Current
$IGBT$	Insulated Gate Bipolar Transistor
$SMAW$	Shielded metal arc welding
MMA	Manual metal arc
$GTAW$	Gas tungsten arc welding
TIG	Tungsten inert gas
$GMAW$	Gas metal arc welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
$FCAW$	Flux-cored arc welding

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les énergies renouvelables, telles que les énergies éolienne et solaire, ont fait l'objet au cours de ces dernières années d'une attention accrue en tant que solution pour affronter les problèmes causés par l'épuisement des énergies fossiles. Ceci permettra d'atténuer les effets des changements climatiques et aussi pour répondre à la croissance mondiale de la demande énergétique [1]. Dans les sites isolés, où le diesel est la seule source d'énergie électrique, les énergies renouvelables viennent également jouer un rôle très important en tant que solutions alternatives pour remplacer carrément le diesel, ou fonctionner en hybridation avec le diesel pour diversifier les ressources énergétiques [2]. A titre comparatif, l'énergie éolienne peut répondre aux besoins énergétiques mieux que le diesel, en raison de son faible coût, de sa propreté et renouvelabilité [3, 4].

L'activité de soudage qui est l'une des activités industrielles les plus demandées dans les sites isolés, comme le cas de l'Algérie pour le soudage des pipelines, nécessite une alimentation électrique fiable. A cette effet, les fabricants offrent des postes à souder spéciaux, équipés de groupes électrogènes, généralement de type diesel, pour pouvoir produire de l'électricité au poste à souder. Ce type des machines se trouve sur le marché en plusieurs procédés de soudage, telles que, Soudage à arc à l'électrode enrobée (SMAW), Soudage à l'arc sous gaz à électrode de tungstène (TIG), Soudage à l'arc sous gaz avec fil-électrode plein (MIG/MAG), etc [5-7]. Tous ces procédés de soudage sont accompagnés de systèmes de contrôle avancés [8, 9]. Cependant, le moteur thermique diesel pose beaucoup de problèmes, tels que le coût et le transport du carburant, la maintenance, le bruit, la pollution et la courte durée de vie.

Généralement les postes à souder à l'arc sont des alimentations à courant continu (DC) [10-12], qui peuvent être une source de courant constant ou une source de tension constante; une source à courant constant fait varier sa tension pour maintenir un courant de référence, tandis qu'une source à tension constante fait varier son courant de sortie pour maintenir une tension de référence [13]. Avec l'apparition des alimentations à découpage (*Switched-Mode Power Supply*), et les modules Transistor Bipolaire à Grille Isolée (IGBT), les postes à souder sont devenus beaucoup plus performants, grâce aux convertisseurs statiques appelés onduleurs de soudage [6, 14, 15]. Il existe de nombreuses topologies d'onduleurs déjà utilisés dans les postes à souder, à savoir : *Flyback*, *Half-Bridge*, *Full-Bridge*, *Push-Pull*, etc [16-18]. Chaque

topologie possède un schéma de commutation particulier, et conçue selon certains critères, comme le type du procédé de soudage, le niveau du courant de soudage, le coût, etc.

Dans cette thèse, nous nous intéressons essentiellement à l'étude d'une petite éolienne de quelques kilowatt afin de l'utiliser comme une alternative du groupe diesel installé dans certains postes à souder à l'arc. Les deux génératrices asynchrones et synchrones peuvent être utilisées dans la chaîne de conversion éolienne [3]. Néanmoins, une éolienne à entraînement direct à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) avec un grand nombre de pôles est choisie dans ce travail de recherche. Une GSAP est plus adaptée aux applications de soudage, vu que le poste à souder nécessite une alimentation à courant continu (DC), et par conséquent, la chaîne de conversion éolienne ne requière qu'une turbine, une GSAP et un redresseur à diodes. De plus, le poste à souder proposé est destiné aux sites isolés ; ce qui nécessite une alimentation fiable et efficace à la fois, permettant d'extraire le maximum d'énergie du vent, même dans les sites à faible vitesse du vent [1, 19]. L'éolienne à vitesse variable à entraînement direct à la GSAP peut répondre à ces exigences [20]. La GSAP offre également d'autres avantages, à savoir: aucun système d'excitation n'est nécessaire, compact (sans le réducteur mécanique) et permet de réduire le poids, le coût, le bruit, les contraintes mécaniques et les interventions de maintenance [1, 21]. Du côté soudage, la topologie d'onduleur optée est une topologie à pont complet (*Full-bridge*), qui répond parfaitement aux exigences des postes de soudage modernes, en raison de sa capacité de contrôler un fort courant avec des commandes numériques avancées [22, 23], et permet aussi d'utiliser le noyau magnétique du transformateur à haute fréquence de manière optimale.

1. Problématique

La plupart des postes à souder munis de groupe électrogène (souvent appelés groupes de soudage) fonctionnent de manière autonome, ce qui n'exige pas un accès au réseau électrique de distribution [23]. C'est pour cette raison, que la majorité de leurs applications se trouvent dans les sites isolés, où ce type est le seul moyen pour faire les activités de soudage. Plusieurs procédés et gammes de puissance sont disponibles sur le marché [13]. Un groupe de soudage est généralement basé sur un moteur thermique à essence ou diesel, couplé mécaniquement à l'arbre d'une génératrice ou d'un alternateur pour produire de l'électricité. Malgré les progrès importants réalisés dans les groupes électrogènes, notamment avec l'apparition des groupes dits groupes onduleur (inverter), qui intègrent des convertisseurs statique de puissance pour produire une qualité d'électricité tolérable [23], les problèmes majeurs restent les mêmes, à savoir :

- Le groupe électrogène doit toujours être surdimensionné (généralement à plus de 200 %) pour couvrir les surcharges importantes durant la procédure de soudage à l'arc [13];
- La dépendance aux carburants ; un petit groupe de 4kW consomme une moyenne de 1.9 l/heure pour un moteur à essence, et 0.9 l/heure pour le diesel ;
- Le transport du carburant qui est un sérieux problème pour les régions éloignées ;

- La fréquence élevée des interventions d'entretien et de maintenance sur le moteur thermique ;
- Autres problèmes, comme la pollution de l'environnement par les huiles et les Gaz à Effet de serre (GES), le bruit et la courte durée de vie.



Fig. 1. Poste à souder à l'arc à base d'un groupe diesel

Ceci a permis de chercher un système plus performant avec un minimum de contraintes mécaniques, électriques et environnementales. Pour cela, la problématique de recherche dans cette thèse est concentrée sur la source d'alimentation des postes de soudage [23]. Le système éolien proposé dans cette thèse peut être une solution très intéressante pour remplacer totalement le groupe électrogène.

2. Objectifs

Avec le développement intensif des technologies des énergies renouvelables, telle que l'énergie éolienne, le Diesel et/ou l'essence ne reste plus la seule et unique source énergétique pour la production de l'électricité dans les sites isolés comme avant [17, 18, 23]. L'objectif principal de cette thèse est d'examiner par simulation MATLAB/Simulink la faisabilité d'utiliser une éolienne industrielle de petite taille à base de GSAP pour construire un générateur de soudage destiné aux sites isolés ; une illustration de ce système est donnée par la figure 2. Une telle solution est également proposée pour diversifier les ressources énergétiques, d'augmenter la fiabilité d'alimentation électrique et de garantir une bonne qualité de fourniture [24, 25]. Nous avons opté pour l'éolienne à vitesse variable munie d'un fonctionnement à maximum de puissance (MPPT), afin d'obtenir une conversion optimale de l'énergie [3, 26]. Le problème de la fluctuation de la production éolienne est résolu par trois systèmes à savoir :

- un banc de batteries de stockage pour satisfaire la demande de l'arc de soudage en cas d'insuffisance ou d'absence de la puissance éolienne ;
- un système de régulation de l'angle de calage des pales, pour limiter la puissance à sa valeur nominale en cas des vitesses du vent élevées ;

- un système de dissipation d'énergie à travers une résistance de puissance, afin de consommer l'excès d'énergie dans le cas où les batteries sont chargées.

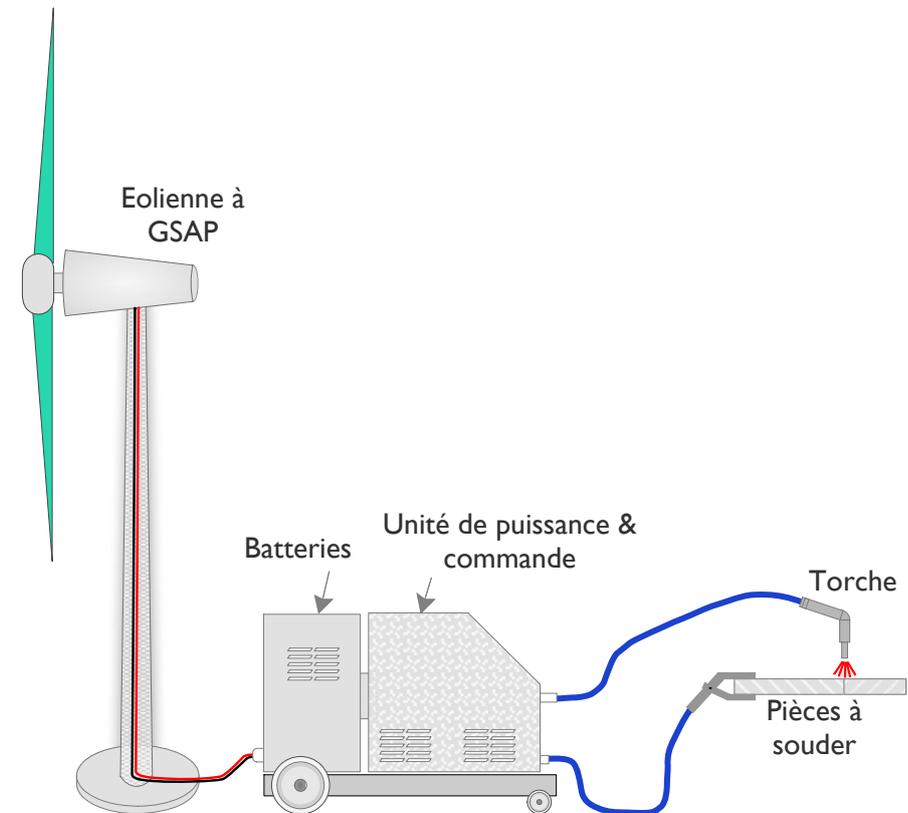


Fig. 2. Illustration d'un poste de soudage à l'arc à base d'une éolienne

3. Structure de la thèse

Pour présenter ce travail de thèse, nous avons organisé le manuscrit en quatre chapitres qui sont :

Dans le premier chapitre, nous présentons la situation énergétique actuelle concernant la production d'électricité à partir de la filière éolienne dans le monde et l'Algérie. En deuxième partie, il donne une descriptive de l'ensemble d'éléments d'un système éolien de grande taille et de petite taille. Ce chapitre nous permet de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale, et donne aussi une idée sur les systèmes éoliens autonomes de petite taille.

Le deuxième chapitre est consacré à la description de l'ensemble d'éléments liés au soudage à l'arc, à savoir, le phénomène de l'arc électrique et sa caractéristique électrique, les principaux procédés de soudage à l'arc et les différentes caractéristiques des générateurs de soudage. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée sur le principe de fonctionnement de différents générateurs de soudage, notamment les onduleurs de soudage avec les topologies les plus utilisées.

Le troisième chapitre présente une étude, puis une modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents multi-pôles à entraînement direct ; tout en traitant l'optimisation de la puissance extraite du vent par l'utilisation de l'une des méthodes de poursuite de la puissance maximale.

Au dernier chapitre, nous proposons une nouvelle conception d'un générateur de soudage à l'arc basé sur une petite éolienne à génératrice synchrone à aimants permanents, afin de l'utiliser comme une alternative du groupe diesel de soudage, déjà employé dans les sites isolés et/ou les régions sans réseau de distribution.

Systeme de Conversion d'Énergie Éolienne



I.1 Introduction

La première application de l'éolienne dans la production de l'électricité a eu lieu en 1890 dans les États Unis. Jusqu'au 1990, la production moyenne d'une éolienne était de l'ordre de 300 kW [27]. Aujourd'hui, on retrouve dans l'industrie éolien divers machines de production allant de quelques centaines de watt pour les applications domestiques jusqu'à 12 MW pour les grandes centrales offshore [3] (voir le tableau 1). La capacité globale du parc éolien installé dans le monde d'ici la fin de l'année 2017 a atteint 539 GW, selon les statistiques publiées par GWEC (Global Wind Energy Council), dont 52.5 GW ont été ajoutées à l'année 2017 [28].

Tableau 1. Développement de la capacité d'éolienne entre 1985 et 2018

Année	Capacité (kW)	Longueur des pales (m)
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1500	70
2003	3000-3600	90-104
2004	4500-500	112-128
2018	12000	107

D'autre part, toutes les éoliennes installées en 2017 peuvent couvrir plus de 5% de la demande mondiale d'électricité. Pour de nombreux pays, l'énergie éolienne est devenue un pilier dans leurs stratégies pour réduire la dépendance aux énergies fossiles et l'énergie nucléaire. En 2017, le Danemark a établi un nouveau record mondial avec 43% de sa puissance provenant du vent. En Chine un volume de 19 GW a été installé en 2017, un peu moins en 2016, et poursuit sa position incontestée de leader de l'énergie éolienne du monde, avec une capacité éolienne totale installée de 188 GW [28].

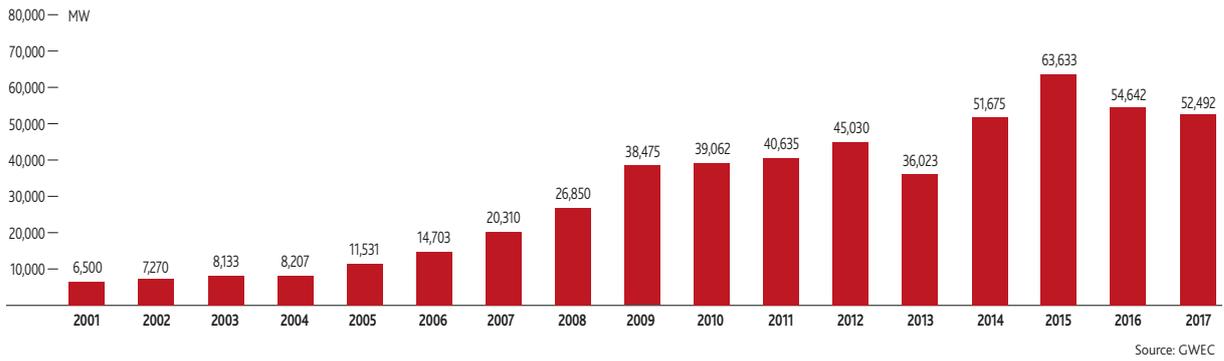


Fig. I. 1. Capacité annuelle installée entre 2001-2017

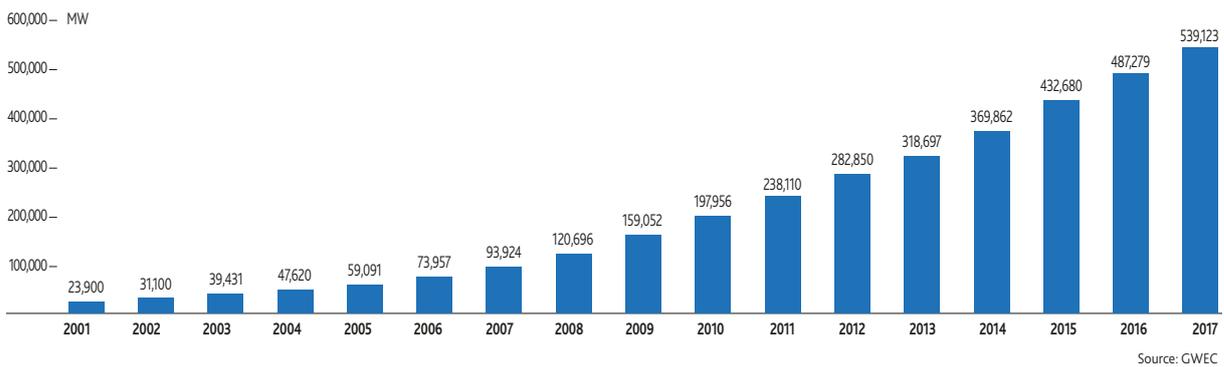


Fig. I. 2. Capacité globale installée cumulée entre 2001-2017

En ce qui concerne les éoliennes de petite taille, qui se trouvent dans beaucoup d'applications, comme le système domestique autonome, pompage et irrigation, injection sur le réseau BT, industrie, systèmes hybrides, systèmes de télécommunication, et systèmes mobiles. Selon le rapport annuel de l'Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEC) sur l'industrie des éoliennes de petite puissance, la fin de l'année 2015, un cumul total d'au moins 991,000 éoliennes de petite taille ont été installées dans le monde, soit une capacité totale de 949 MW [29]. Cela représente une augmentation de 5 % (8% en 2014 et 7,4% en 2013) par rapport à l'année précédente, lorsque 945,000 unités ont été installées.

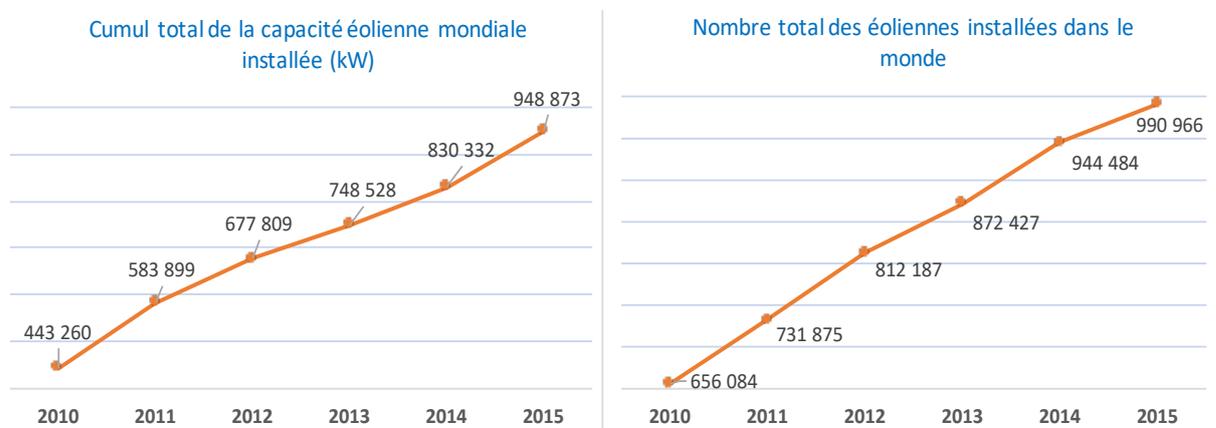


Fig. I. 3. Capacité totale et nombre total des éoliennes petites puissance installées dans le monde

La Chine continue à dominer le marché de petites éoliennes avec 43,000 unités ajoutées en 2015, environ 20,000 de moins qu'en 2014 pour atteindre 732,000 unités installées à la fin de 2015. Le marché chinois représente désormais près de 74% du marché mondial en termes de total des nouvelles installations en 2015. Aux États-Unis, l'industrie de petites éoliennes a enregistré un nombre de nouvelles installations similaire à celui de l'année précédente, avec 1,695 unités ont été installées en 2015 [29]. Les États-Unis constituent le deuxième marché avec un nombre total d'unités installées de 160,995, soit nettement derrière la Chine, mais elle est loin [29].

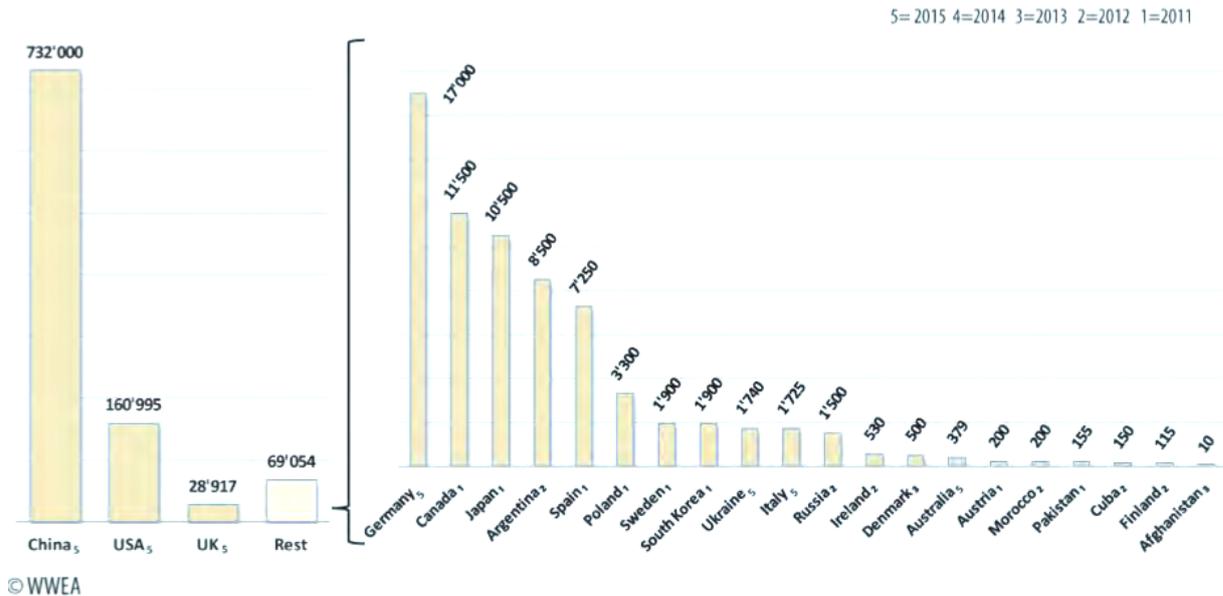


Fig. I. 4. Nombre total des éoliennes de petite puissance installées par pays

I.2 Développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie s'est engagée à travers la société Sonelgaz, depuis 2011 sur la voie des énergies renouvelables par la mise en place de deux centrales pilotes (expérimentales) en juin 2014, à savoir la centrale photovoltaïque de 1,1 MW de Ghardaïa et la centrale éolienne de 10,2 MW d'Adrar [30]. Ceci afin de développer les énergies renouvelables à grande échelle dans le moyen terme. En effet, La nouvelle mouture du programme national de développement des énergies renouvelables revoit à la hausse les capacités de production à partir de sources renouvelables en les portant à 22.000 MW sur la période 2015-2030 au lieu de 12.000 MW comme arrêtés dans le précédent programme de 2011 [31]. Les filières solaire photovoltaïque et éolien sont particulièrement privilégiées. Sur ce programme, un volume de 354 MW a été réalisé sur la période 2014-2016, soit un parc de production d'origine renouvelable mis en service de 379 MW [30]. La répartition de ce parc de production est donnée par le Tableau 2 et la figure I.5

Tableau 2. Centrales de type renouvelables (EnR) installées en Algérie

Centrales	P. Installée (MWc)	Centrales	P. Installée (MWc)
Réseau PIAT (63.2)		Réseau RIN (266.1)	
Éolienne de Kabertène (Adrar)	10,2	Solaire Thermique de Hassi R'mel	25
Adrar PV	20	Oued Nechou (Ghardaia) PV	1,1
Kabertène (Adrar) PV	03	Sedret Leghzel (Naâma) PV	20
In Salah (Tamanrasset) PV	05	Oued El kebrit (Souk Ahras) PV	15
Timimoun (Adrar) PV	09	Ain Skhouna (Saida) PV	30
Reggane (Adrar) PV	05	Ain El Ibel (Djelfa) 1 et 2 PV	53
Zaouiet Kounta (Adrar) PV	06	El kheneg (Laghouat) 1 et 2 PV	60
Aoulef (Adrar) PV	05	Telagh (Sidi-Bel-Abbes) PV	12
Réseau RIS (25)		El Abiodh Sidi Cheikh (El Bayadh) PV	23
Tamanrasset PV	13	El Hadjira (Ouargla) PV	30
Djanet (Illizi) PV	03	Ain EI Melh (M'Sila) PV	20
Tindouf PV	09	Oued El Ma (Batna) PV	02
		Total (EnR)	379,3 MW

PV : Centrale Photovoltaïque

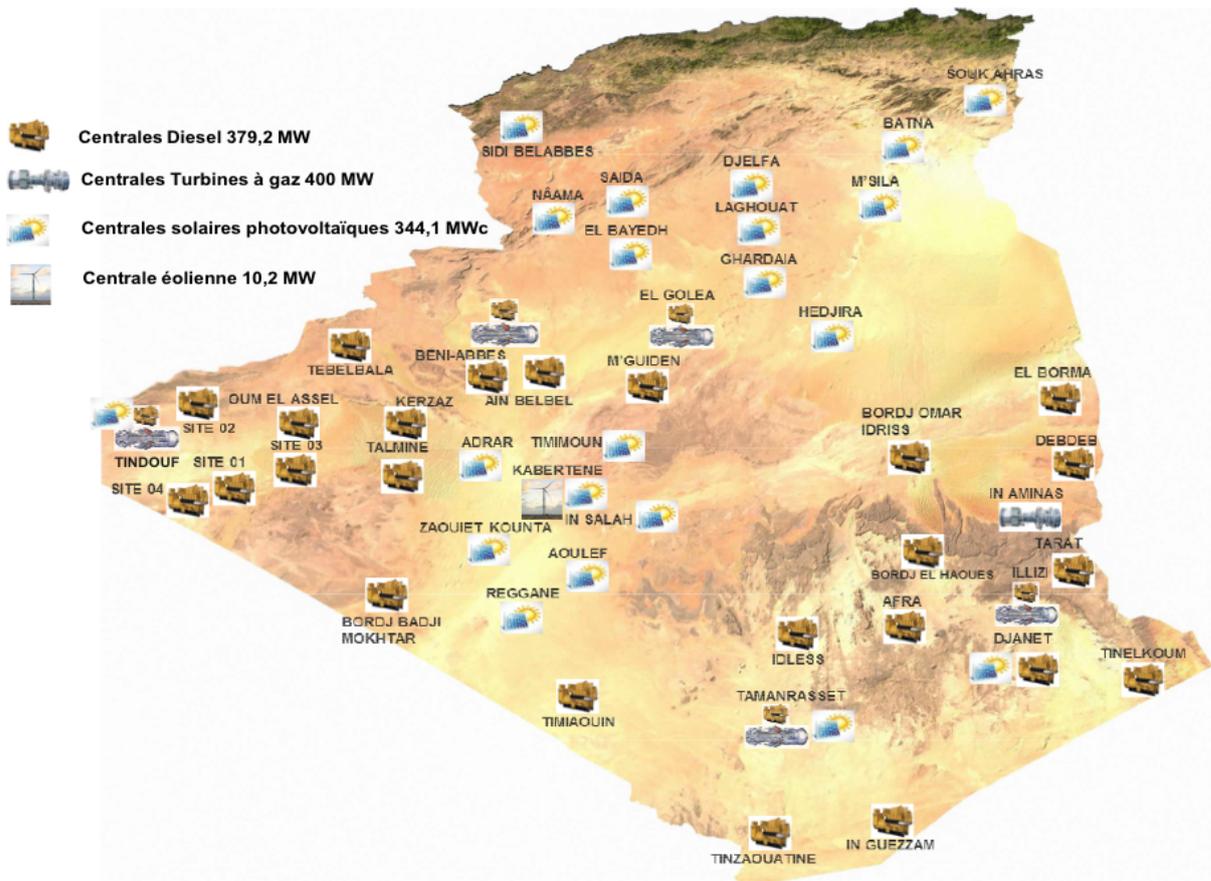


Fig. I. 5. Localisation des centrales EnR en Algérie

*Centrale d'Adrar**Centrale de Kabertène**Centrale de Djelfa**Centrale de Laghouat**Centrale de Tamanrasset**Centrale de Souk Ahras**Ferme éolienne d'Adrar**Centrale de Hassi R'mel dont 25 MW CSP**Fig. I. 6. Photos de quelques centrales de types EnR installées en Algérie*

I.3 Gisement éolien en Algérie

L'Algérie dispose d'un gisement éolien considérable dans le Sud-Est du pays, estimé par Boudia en [32], Dr Chellali en [33], Dr Kasbadji-merzouk en [34]. L'étude la plus récente, a été réalisée en 2013 par Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10 m de l'Algérie (donnée par la figure I.7), en utilisant des données météorologiques plus récentes de 87 stations de mesure [32]. Il a été constaté que les vitesses moyennes annuelles varient sur l'ensemble du territoire entre 1.2 et 6.3m/s. La région d'Adrar garde sa suprématie en terme de vitesse maximale du vent avec 6.3m/s. La région de Hassi R'mel lui succède avec une vitesse moyenne annuelle égale à 6.1m/s. Le site de Tindouf prend la troisième place avec une vitesse qui avoisine les 6m/s. Il a également constaté que la majorité des grandes vitesses moyennes annuelles se situent au Sud du pays, comprenant aussi In-Salah, Bordj-Badji-Mokhtar à

l'extreme Sud du Sahara et Timimoun avec des vitesses comprises entre 4.9 et 5.8 m/s [32]. Par rapport à ces résultats, Sonelgaz s'est engagée dans une phase d'exploitation des énergies éoliennes. Actuellement un volume de production de 10.2 MW constitué de 12 éoliennes de 850 kW est déjà en service à Kabertène dans la région d'Adrar depuis juin 2014 [30, 31]. Aussi, un programme de 5.000 MW de production d'origine éolienne sur la période 2015-2030 est retenu par l'état.

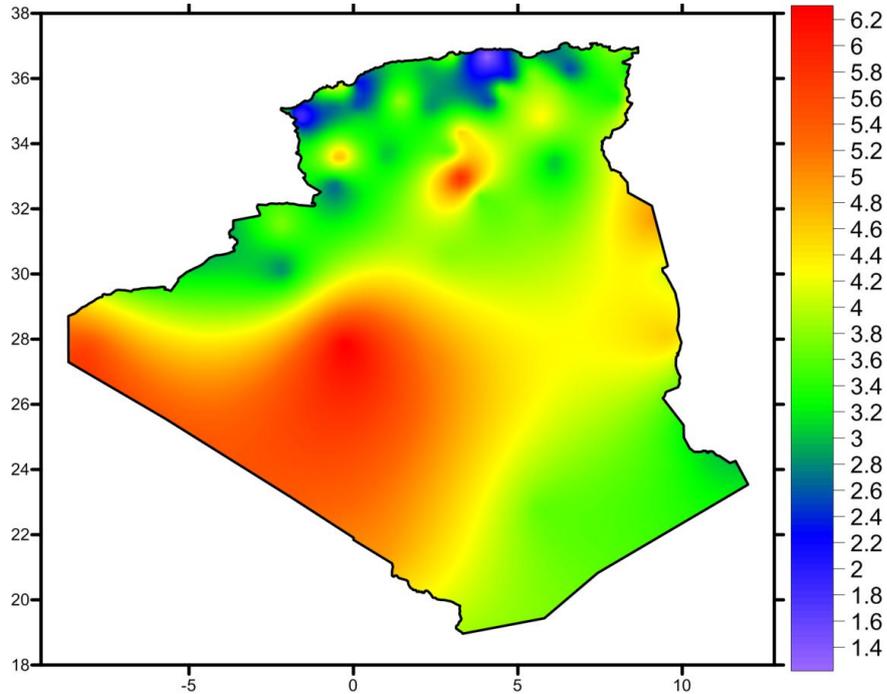


Fig. I. 7. Carte annuelle des vents à 10m du sol (m/s)

I.4 Capteurs éoliens

L'éolienne est un dispositif de conversion d'énergie ; elle transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique. Cette conversion d'énergie se fait en deux étapes comme le montre la figure I.8 [24, 26]:

- Conversion de l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique sous forme de rotation, puis transmise à l'arbre de la turbine.
- Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au moyen d'un dispositif d'aérogénérateur



Fig. I. 8. Phases de conversion énergétique d'une éolienne

I.4.1 Caractéristiques du vent

Le vent étant une source intermittente, sa direction et sa vitesse changent rapidement avec le temps (figure I.9). En accord avec ces changements, la puissance et l'énergie éolienne disponible dans un site donné varient.

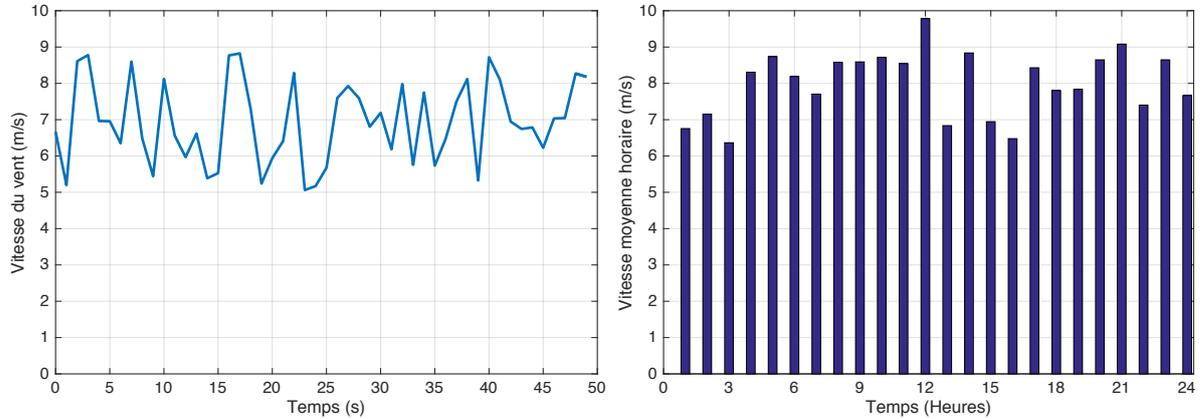


Fig. I. 9. Variations temporelles de la vitesse du vent

La vitesse moyenne annuelle du vent est un facteur extrêmement important pour examiner la faisabilité d'installer un système éolien, et la taille unitaire de l'éolienne à choisir. En effet, la vitesse moyenne du vent est généralement calculée sur une période de temps. Les données du vent change d'une année à une autre ; toutefois les études dans le domaine du gisement éolien ont montré que les vitesses du vent suivent des distributions statistiques bien déterminées [26]. Il a également été trouvé que la distribution du vent peut être décrite par la fonction de densité de probabilité appelée Weibull, qui est décrite comme suit [26, 27]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad \text{I.1}$$

Où $f(v)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull, c et k sont les paramètres de Weibull appelés respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme et v est la vitesse du vent. La distribution de fréquence de Weibull est un modèle reconnu de façon générale par la communauté scientifique dans le domaine éolien puisqu'il a démontré de bons résultats. Cette loi est caractérisée par deux paramètres [26]:

- Le paramètre de forme k : C'est un facteur sans dimension, qui détermine la forme et la largeur de la distribution ; Les petites valeurs de k indique la grande concentration du vent en dessous de la vitesse moyenne dans le site et vis vers ça ;
- Le paramètre d'échelle c : C'est un facteur lié la vitesse moyenne du vent de l'emplacement en m/s ; Ce paramètre donne une vision préliminaire sur la vitesse des turbines à utiliser sur le site [26].

La figure I.10 présente l'histogramme des fréquences de vitesse du vent, la distribution de Weibull et les moyennes mensuelles des vitesses à 10 m d'hauteur pour le site de Hassi R'mel (Algérie) basé sur des mesures effectuées entre 2004 et 2009.

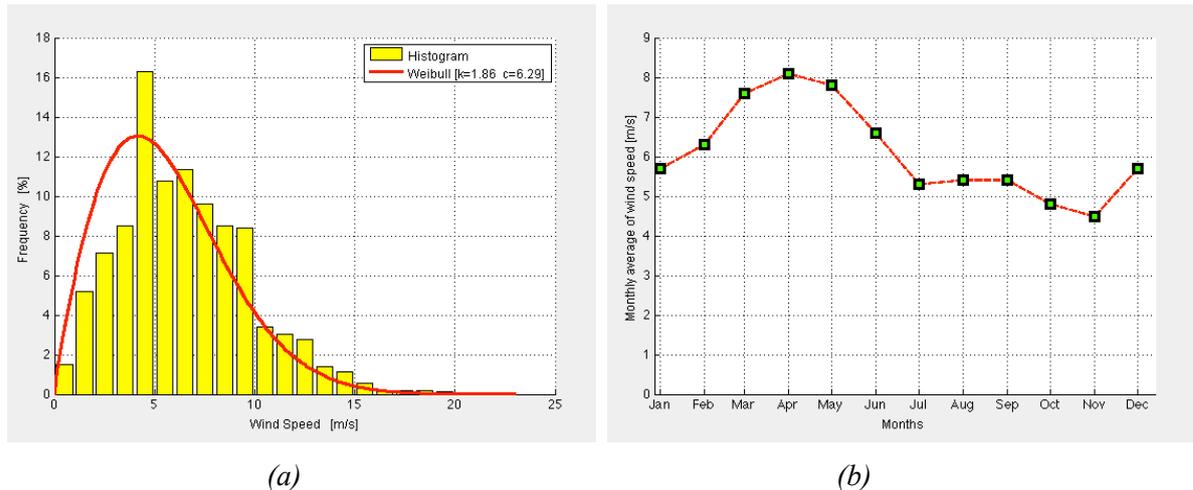


Fig. I. 10. (a) Distribution de Weibull, (b) les moyennes mensuelles des vitesses pour le site de Hassi R'mel (Algérie)

I.5 Classement des Turbines Éoliennes

On peut classer les éoliennes en deux principales catégories qui se différencient essentiellement dans leur organes de captage d'énergie, à savoir la turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol, il existe les éoliennes à axe vertical, et les éoliennes à axe horizontal.

I.5.1 Éoliennes à axe vertical

Ces éoliennes sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreux types avaient été expérimentés dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, à savoir, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus (voir la figure I.11).

a) Rotor de Savonius

Le rotor de Savonius est constitué de deux demi-cylindres reliés à un axe vertical. Le rendement de cette éolienne est plus faible par rapport à celui des éoliennes à axe horizontal, mais elle permet d'exploiter des vitesses de vent plus faibles. De faible encombrement et plus silencieuses que les autres éoliennes, les éoliennes de type Savonius ont été étudiées pour l'intégration en milieu urbain mais peinent à trouver leur place notamment à cause de leur coût de production électrique qui reste très élevé.

b) Rotor de Darrieus

Les éoliennes de Darrieus sont à pales verticales paraboliques ou hélicoïdales, qui utilisent la force de portance du vent pour produire le couple mécanique, comme les éoliennes à axe horizontal. Toutefois, leur encombrement plus faible est un avantage en termes d'intégration paysagère et architecturale.

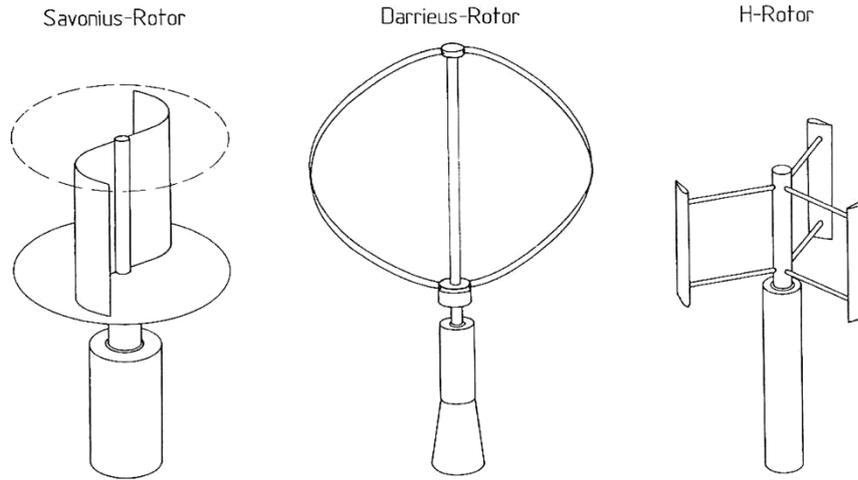


Fig. I. 11. Éoliennes à axe vertical

I.5.2 Éoliennes à axe horizontal

La turbine dans les éoliennes à axe horizontal demeure face au vent, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie (voir la figure I.12). La majorité des éoliennes installées dans le monde sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme le rendement énergétique élevé par rapport aux éoliennes à axe vertical. Toutefois, le multiplicateur mécanique et le générateur doivent être installés en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques.

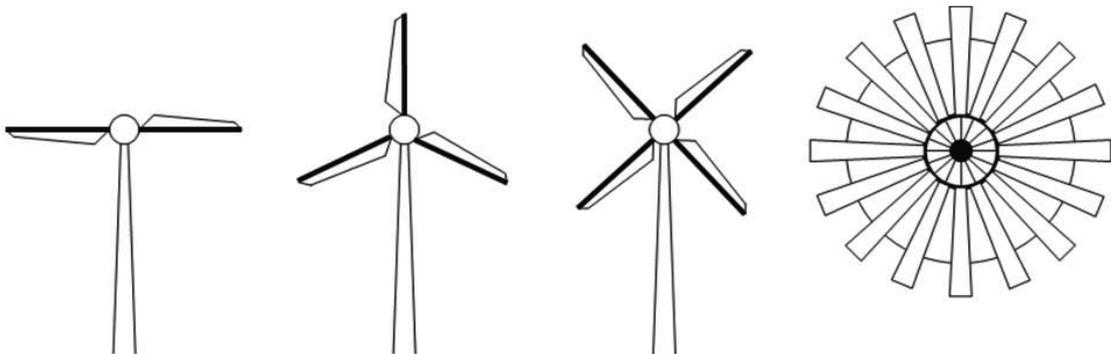


Fig. I. 12. Éoliennes à axe horizontal

I.6 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

La figure I.13 présente les courbes du coefficient de puissance C_p pour différents types d'éoliennes. Le coefficient de puissance théorique est aussi présenté comme référence [27]. les éoliennes les plus utilisées sont les éoliennes à axe horizontal, notamment celles à tripales, car elles offrent le plus grand coefficient de puissance, qui est à l'ordre de 50%. Cependant, les éoliennes à axe vertical telles que le rotor de Savonius et le rotor de Darrius offrent un rendement modeste.

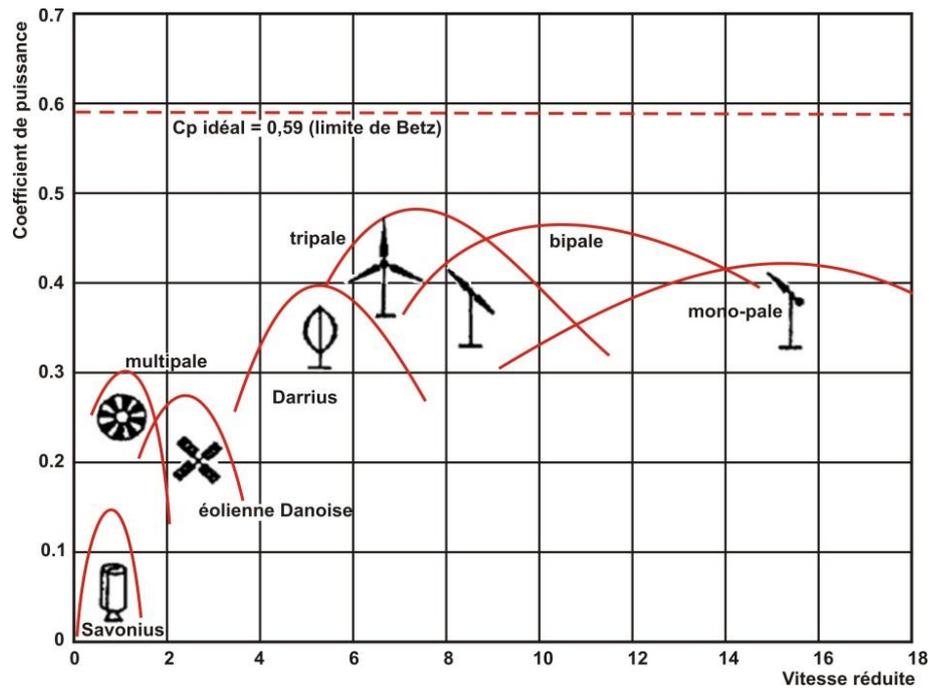


Fig. I. 13. Coefficient de puissance de différents types d'éoliennes

(Source: Eldridge, F.R., Wind Machines, Energy Research and Development Administration, Washington, DC, Report AER-75-12937, p. 55, 1975.)

I.7 Constitution d'une éolienne

L'éolienne est principalement constituée des éléments présentés dans la figure I.14 [25].

- Le mat : C'est le support de la nacelle, Il est important qu'il soit le plus haut possible du fait d'avoir une vitesse du vent élevée et stable ;
- La nacelle : Elle est formée par une armature métallique regrouper principalement le multiplicateur de vitesse, le générateur électrique, et les étages de convertisseurs de puissance et de commande ;
- L'arbre lent: Il assure la liaison mécanique entre le moyeu et le multiplicateur de vitesse ;
- L'arbre rapide: Il assure la liaison mécanique entre le multiplicateur de vitesse et le générateur, et peut être équipé d'un système de freinage aérodynamique ;
- Le multiplicateur de vitesse : C'est un système d'engrenage qui permet d'adapter la vitesse de la turbine avec la vitesse du générateur ;
- Le système de refroidissement : Un refroidissement à l'huile pour le multiplicateur de vitesse, et un ventilateur pour le générateur ;
- Le générateur : C'est une machine tournante installée pour produire de l'électricité ;
- Le système de commande : Les différents circuits qui commandent les performances de l'éolienne et qu'il la protège en cas de défaillance ;
- Le système d'orientation des pâles : Il sert à contrôler la puissance extraite par la turbine.

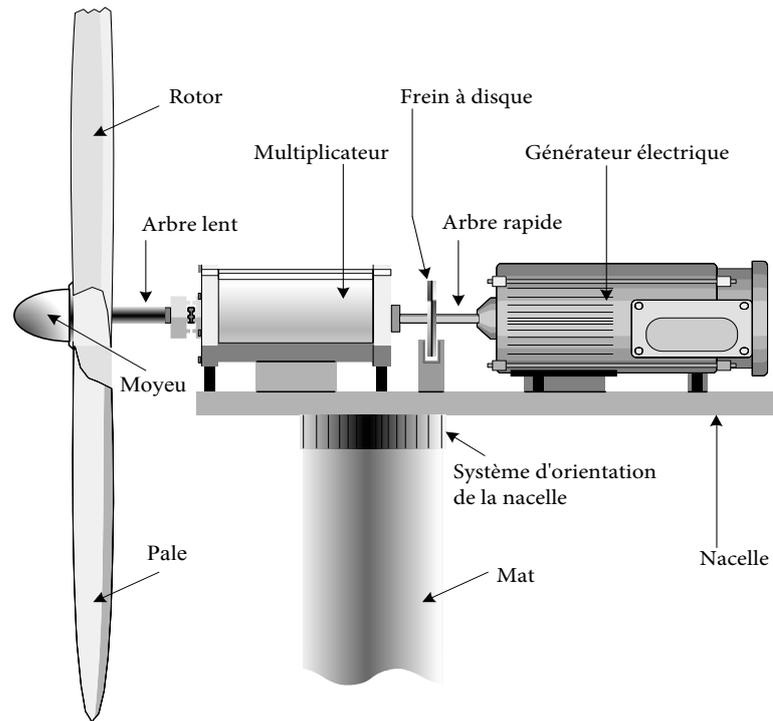


Fig. I. 14. Les éléments constitutifs d'une éolienne

I.8 Conversion aérodynamique

L'écoulement d'air sur un profil aérodynamique (coupe transversale d'une pale, voir la figure I.15) provoque une force de portance F_L , et une force de traînée F_D [24, 26]. La force de portance est perpendiculaire à la direction de l'écoulement d'air, tandis que la force de traînée est dans la même direction de l'écoulement d'air. L'angle de calage β est l'angle entre la ligne de corde du profil et le plan de rotation. L'angle d'attaque α est l'angle entre la ligne de corde du profil et la direction du vent apparent. Si l'angle d'attaque dépasse une certaine valeur, un sillage est créé au-dessus du profil, ce qui réduit la force de portance et augmente la force de traînée. Par conséquent, l'écoulement d'air autour du profil s'est calé. La force de portance et de traînée sont données comme suit [35]:

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho C_L v_{rel}^2 dx \quad \text{I.2}$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho C_D c v_{rel}^2 dx \quad \text{I.3}$$

Ou :

ρ : densité de l'air.

C_D, C_L : coefficient de traînée et coefficient de portance respectivement (dépendant de α).

c : longueur de corde du profil aérodynamique

dx : portée élémentaire

v_{rel} : vitesse relative (apparente), qui est la résultante de la vitesse du vent et la vitesse tangentielle causée par la rotation.

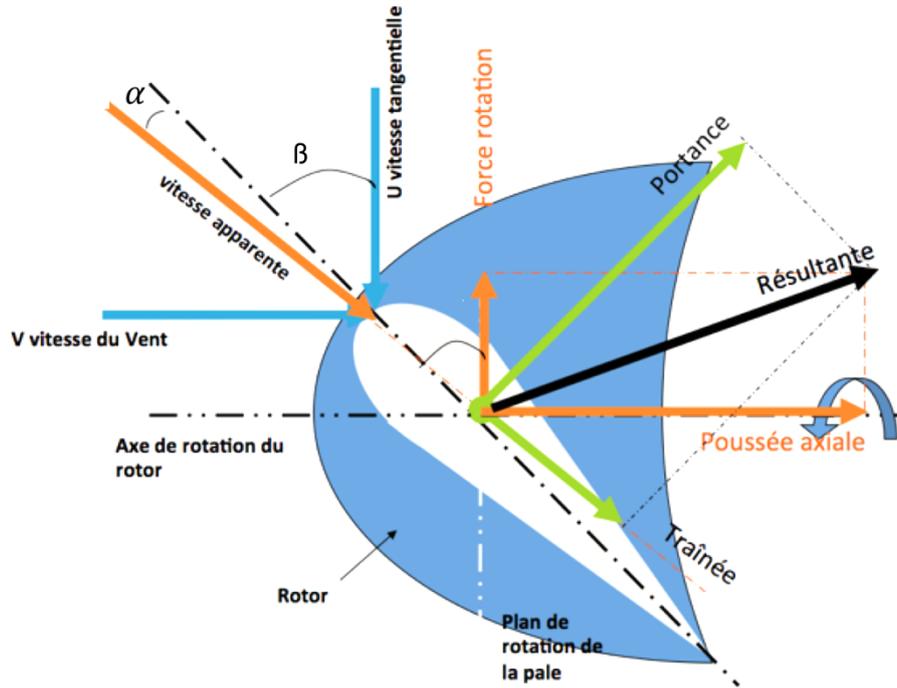


Fig. I. 15. Efforts sur un profil aérodynamique d'une pale

Seule la portance contribue à la génération du couple utile, la traînée crée plutôt un couple dans le sens inverse. Par conséquent, un rapport élevé entre la portance et la traînée C_L/C_D est fortement conseillé pour avoir un bon rendement de la turbine.

I.9 Conception des éoliennes

Généralement, les éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou à vitesse variable. Pour les éoliennes à vitesse fixe, la génératrice (synchrone ou asynchrone) est directement connectée au réseau [3]. Comme la vitesse est presque fixée à la fréquence du réseau, donc elle est certainement incontrôlable. Par conséquent, la turbulence du vent entraînera des variations de puissance et par la suite injectera une mauvaise qualité d'énergie sur le réseau [24]. Pour une éolienne à vitesse variable, la génératrice est contrôlée par un convertisseur d'électronique de puissance, ce qui permet de contrôler la vitesse de l'éolienne. De cette façon, les fluctuations de puissance causées par les variations de vent peuvent être plus ou moins absorbées en modifiant la vitesse de l'éolienne, ce qui permet d'améliorer la qualité d'énergie par rapport à une éolienne à vitesse fixe [3].

I.9.1 Éolienne à vitesse fixe

Pour cette conception, le générateur est directement connecté au réseau électrique comme le montre la figure I.16. La vitesse de rotation de l'éolienne est réglée par le multiplicateur et le nombre de paires de pôles du générateur. Ce type d'éoliennes est souvent équipé de deux générateurs (généralement asynchrone), l'un pour les vents faibles (avec une

vitesse synchrone plus faible) et l'autre pour les vitesses de vent élevées [25]. Ce concept était utilisé par de nombreux fabricants danois dans les années 1980.

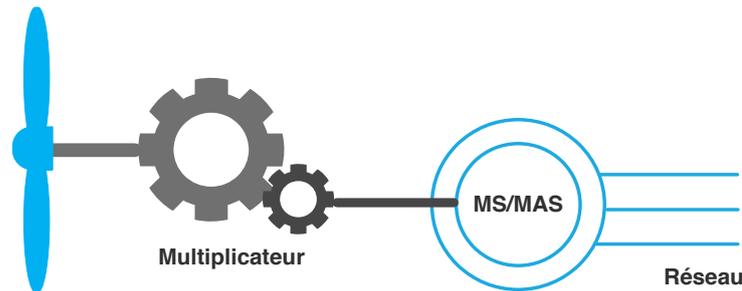


Fig. I. 16. Conception d'une éolienne à vitesse fixe

I.9.2 Éolienne à vitesse variable

Ce concept consiste en utilisation d'un étage intermédiaire (constitué généralement d'un redresseur et un onduleur) entre le générateur et le réseau [27]. Le générateur donc peut être soit un générateur asynchrone, ou un générateur synchrone. La boîte de vitesses est conçue pour que la vitesse maximale de l'éolienne correspond à la vitesse nominale du générateur. Ce système est bien développé, robuste et couramment utilisé. La figure I.17 représente un exemple de ce concept.

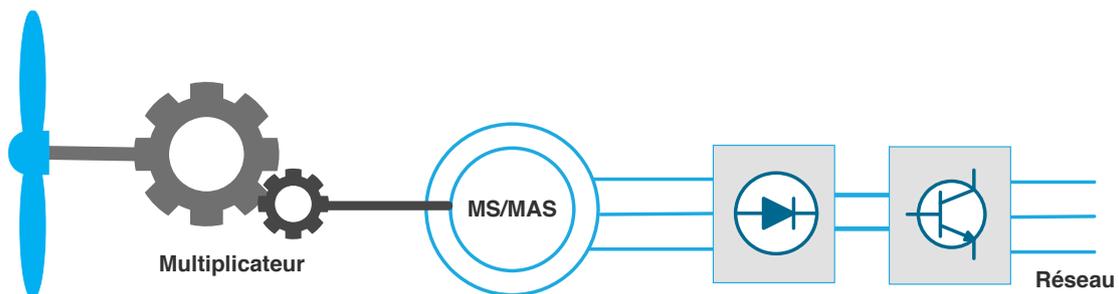


Fig. I. 17. Conception d'une éolienne à vitesse variable

I.9.3 Éolienne à vitesse variable avec un générateur multi-pôles

Les génératrices synchrones et notamment ceux à aimants permanents peuvent être conçues avec un grand nombre de pôles, ce qui implique qu'aucune boîte à engrenages (multiplicateur mécanique) n'est nécessaire, comme le montre la figure I.18. Ce système est appelé souvent système à entraînement direct. Pour la génératrice synchrone à aimants permanents, la commande est bien avancées, robuste et constitue un avantage majeur. Sur le plan d'industrialisation, la GSAP est majoritairement utilisée pour les grandes puissances de l'ordre de Mégawatt, comme pour les petites puissances de l'ordre de kilowatt [24].

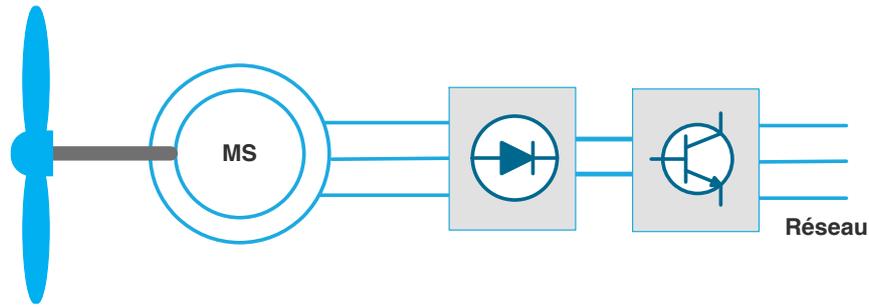


Fig. I. 18. Conception d'une éolienne à vitesse variable à entraînement direct

I.9.4 Éolienne à vitesse variable limitée

Ce système consiste en une éolienne avec un générateur asynchrone à double alimentation (MADA). Cela signifie que le stator est directement connecté au réseau tandis que le rotor est connecté via des bagues collectrices à travers deux convertisseurs de puissance Redresseur/Onduleur, comme montré par la figure I.19. Ces convertisseurs Redresseur/Onduleur sont dimensionnés pour que le générateur puisse fonctionner dans une plage de vitesse variable limitée, à environ $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme [3]. Le rapport du multiplicateur mécanique est réglé de manière à ce que la vitesse nominale du générateur corresponde à la valeur médiane de la plage de vitesses de l'éolienne. Ceci est fait afin de minimiser la taille du Redresseur/Onduleur. Avec ce concept, il est possible de contrôler la vitesse de rotation de l'éolienne dans la plage autorisée afin d'optimiser la puissance produite. Actuellement, cette structure est fréquemment utilisée dans la gamme moyenne puissance.

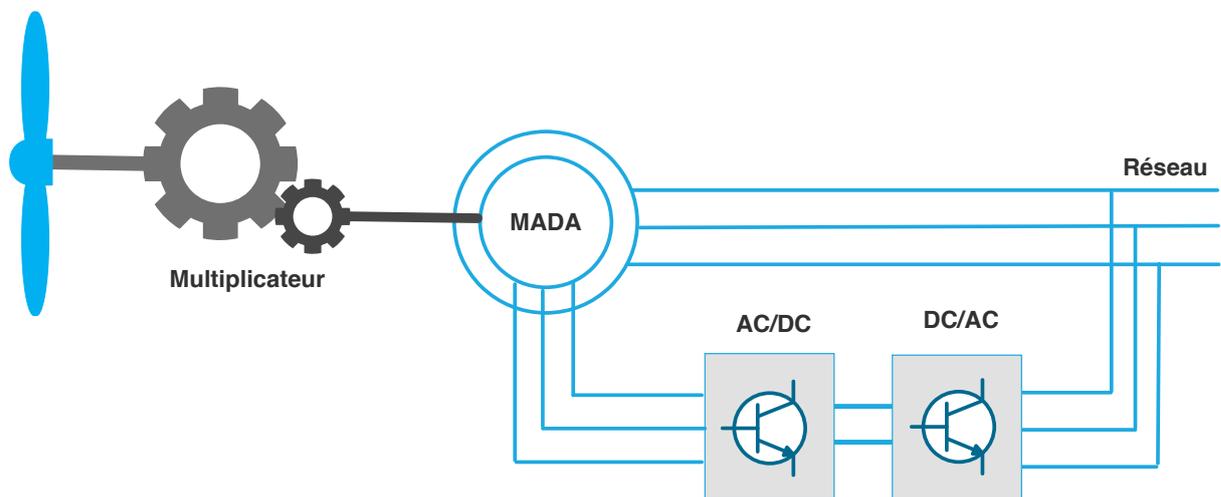


Fig. I. 19. Conception d'une éolienne à vitesse variable limitée

I.9.5 Autres types de générateurs pour les petites éoliennes

Pour les éolienne de petite taille, jusqu'à 20 kW, trois générateurs sont généralement utilisés par les fabricants des éoliennes, à savoir, la génératrice synchrone à aimants permanents, la génératrice à excitation bobinée, et la génératrice à courant continu. La GSAP

offre beaucoup d'avantage comme ses meilleurs performances, sa robustesse et sa légèreté. Par contre, la génératrice à courant continu offre un meilleur prix.

I.10 Régulation mécanique

I.10.1 Régulation par l'angle de calage (pitch angle control)

Ce type de régulation nécessite un mécanisme (électrique ou pneumatique) pour faire tourner les pales de la turbine. En effet, il se réalise par un ajustement de l'incidence du vent sur les pales à travers le changement de l'angle de calage, ce qui modifie l'angle d'attaque, et par la suite modifie la puissance mécanique extraite à l'arbre de la turbine [25]. Donc, pour limiter la puissance à certaine valeur, il suffit d'ajuster sur cet angle ; sinon la mettre à zéro pour avoir une puissance maximale (figure I.20). Aussi, avec ce type de régulation, l'éolienne peut démarrer à faible vitesse du vent, en minimisant le couple de démarrage à travers l'augmentation de l'angle de calage. Il se peut également réaliser la position de drapeau en maintenant l'angle de calage à 90° pour protéger l'éolienne contre les vents violents.

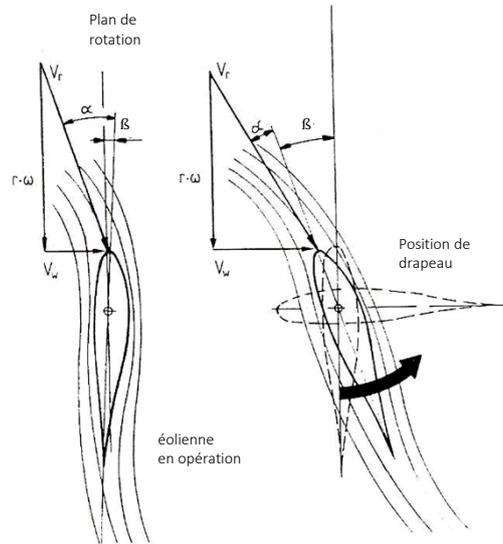


Fig. I. 20. Régulation mécanique par l'angle de calage

I.10.2 Régulation par l'angle fixe (passive stall control)

Pour réaliser ce type de régulation, les profils des pales doivent être conçus de manière appropriée. Lorsque le vent dépasse certaine valeur, cette conception de profil provoque une chute soudaine de la portance (phénomène de décrochage aérodynamique comme montré par la figure I.21), ce qui forme des turbulences au-dessus des pales, ce qui limite par la suite la puissance extraite.

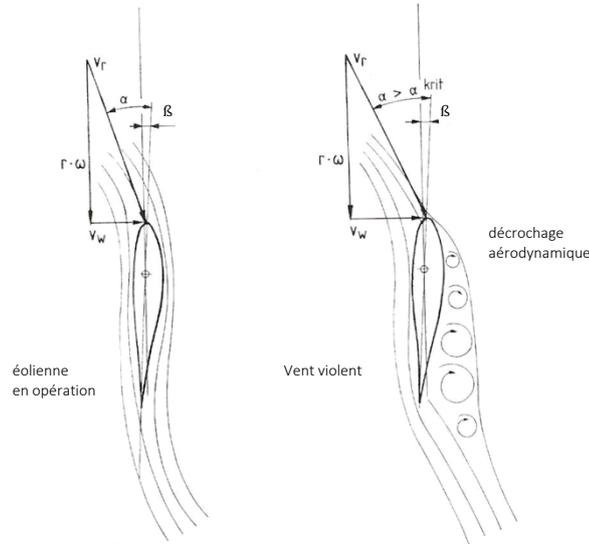


Fig. I. 21. Régulation mécanique par Stall

I.10.3 Régulation Stall Active

Ce type combine les deux types de régulation précédents. Pour les plages de vent inférieur à la vitesse nominale, la régulation par angle de calage est utilisé pour contrôler la puissance extraite. Par contre, pour les vitesses du vents élevées, le mécanisme d'orientation des pales est utilisé à nouveau pour avoir le décrochage aérodynamique qui joue un rôle très important pour perdre la portance.

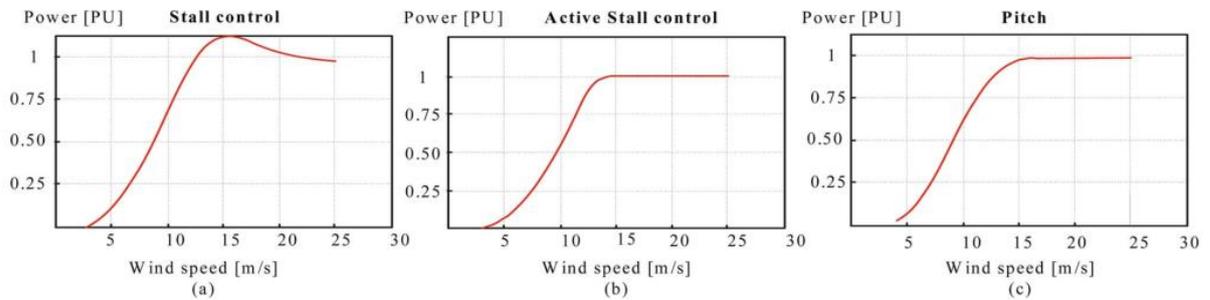


Fig. I. 22. Caractéristique de puissance pour différents type de contrôle

I.11 Besoins des systèmes éoliens à petite taille

Dans le domaine de l'électrification rurale, la meilleur solution est celle qui se base sur la réalisation des extensions du réseau de distribution vers les clients en sites isolés. Si cette solution n'est pas faisable techniquement, l'utilisation des groupes diesel est une nécessité pour fournir l'électricité. Cependant, cette solution peut être couteuse, sous oublier ses problèmes de maintenance et d'environnement. L'introduction de technologies renouvelables peut contribuer à diminuer les coûts de fourniture d'électricité pour ces sites isolés en réduisant les coûts de fonctionnement du diesel par la mise en place des systèmes hybrides diesel avec une source renouvelable. Les systèmes autonomes à 100 % renouvelable, comme le photovoltaïque ou

éolien avec des batteries de stockage, peuvent aussi être une solution intéressante. En effet, ils sont actuellement exploités pour plusieurs applications comme :

- Le système domestique ;
- Le pompage et irrigation ;
- L'injection sur le réseau BT ;
- L'industrie ;
- Les systèmes de télécommunication ;
- Les systèmes mobiles.

I.12 Configurations des systèmes éoliens autonomes

Un système éolien autonome est celui qui n'est pas relié à un réseau de distribution. Donc un système autonome doit fournir de l'électricité et assurer sa continuité. Pour cela, un système de stockage à base des batteries (généralement à plomb) est nécessaire pour couvrir les moments d'insuffisance d'énergie éolienne. Il existe trois principales configurations pour concevoir un système éolien autonome à partir d'une éolienne de petite taille basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. La première configuration se base sur un redresseur parallèle double généralement constitué de transistors FET, commandé par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion), comme le montre la figure I.23.

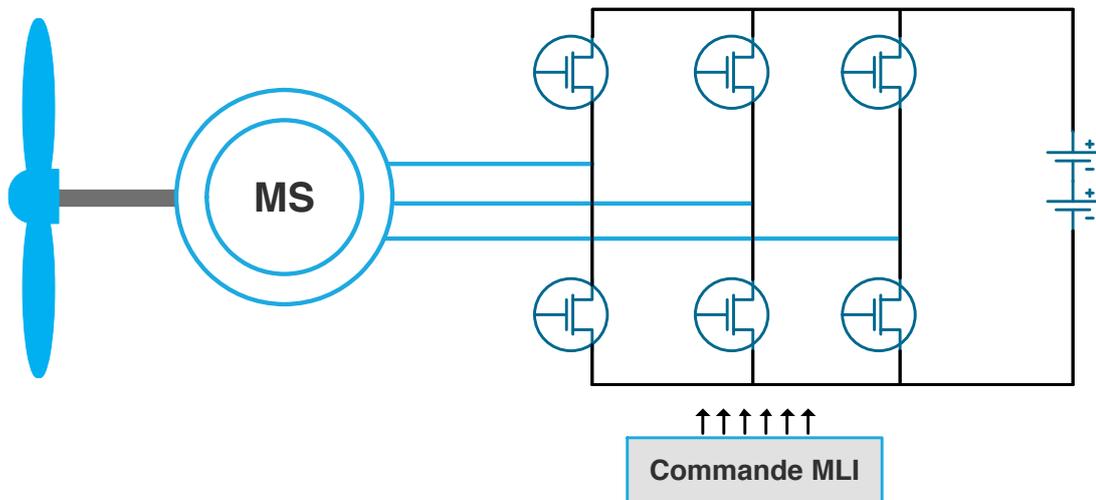


Fig. I. 23. Système éolien autonome à base d'un redresseur commandé

Étant donné que la tension de la GSAP est proportionnelle à la vitesse de rotation de la turbine, le redresseur commandé permet de maximiser la puissance extraite par la turbine et adapter la tension de la génératrice à la tension de la batterie. Néanmoins, il ne permet que de réduire cette tension, chose qui limite le choix du niveau de tension de la batterie. Cette configuration présente aussi l'inconvénient d'être un peu coûteuse.

D'autre part, pour alimenter les charges à tension alternative, on peut ajouter un onduleur qui sera alimenté par la batterie.

La deuxième configuration est basée sur un redresseur parallèle double à diodes, comme le montre la figure I.24. Cette configuration permet de réduire considérablement le coût du système. Néanmoins, elle ne permet pas d'optimiser la puissance extraite de la turbine.

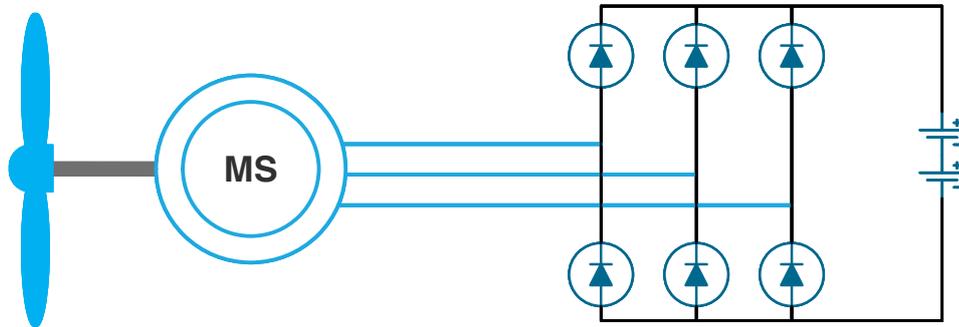


Fig. I. 24. Système éolien autonome à base d'un redresseur non commandé

La troisième configuration qui est représentée par la figure I.25, se base sur un redresseur parallèle double à diode en cascade avec un hacheur pour permettre d'optimiser la puissance extraite de la turbine, et ce à travers la commande du hacheur. Cette solution est la plus utilisée et la plus avantageuse vu qu'elle réunit la simplicité du système, le coût, et la robustesse de la commande.

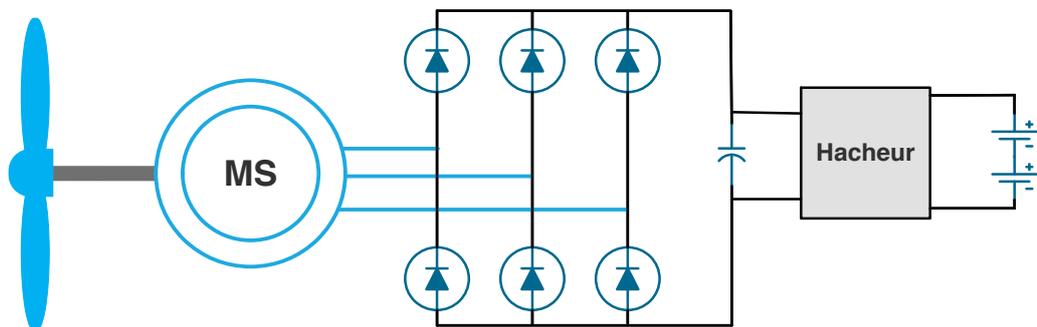


Fig. I. 25. Système éolien autonome à base d'un hacheur

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des éléments d'un système éolien de grande taille et de petite taille. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur les systèmes éoliens autonomes. La structure à vitesse variable à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents a attiré notre attention vu les avantages qu'elle présente. C'est la raison pour laquelle nous allons consacrer le reste de cette thèse pour l'étude de cette structure afin de concevoir un générateur de soudage à l'arc destiné aux sites isolés.

Générateurs de Soudage à l'arc

II

II.1 Introduction

Le soudage est un procédé d'assemblage permanent par lequel des matériaux de même nature ou même type sont joints au travers d'une réaction chimique résultante d'une action combinée de chaleur et de pression [36]. Pour assurer la continuité du matériau, il faut que le soudage soit réalisé à l'échelle de l'édifice atomique. Le terme soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. Beaucoup des métaux sont soudables moyennant des études préalables requises pour la mise au point du mode opératoire, et le soudage d'acier reste le plus largement utilisé.

La figure II.1 représente un exemple de soudage des aciers inoxydables, il s'agit de la réalisation d'un support du aérogénérateur de petite éolienne à axe horizontal.



Fig. II. 1. Nacelle de petite éolienne réalisée par des soudures à l'arc

Pour le soudage des métaux on peut distinguer trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature ;
- La soudure hétérogène de type A, qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature ;
- La soudure hétérogène de type B, où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes.

II.2 Soudage à l'arc

Le soudage à l'arc est un procédé de soudage qui permet d'assembler deux métaux en utilisant un arc électrique [37]. C'est l'échauffement créé par la résistivité des métaux parcourus par un courant électrique qui élève la température au point de soudure jusqu'à celle requise pour la fusion du métal. En effet, les générateurs de soudage doivent être capables de fournir un courant électrique suffisamment élevé, plus de 60 A pour atteindre cet objectif. L'avantage majeur de cette technique de soudage est que la chaleur de l'arc est facilement concentrée et maîtrisée.

Historiquement, le soudage à l'arc a été réalisé à l'aide d'électrodes de carbone, développées par Bernardos en 1887, puis à l'aide de tiges d'acier [38]. La soudure n'était cependant pas protégée de l'air et il y avait des problèmes de qualité. Le Suédois Oskar Kjellberg a réalisé en 1914 une avancée importante en développant et en brevetant l'électrode enrobée, comme le montre la figure II.2. Le résultat de soudage était incroyable et le soudage à l'arc utilisant des électrodes revêtues devint la base de la société de soudage ESAB [39].

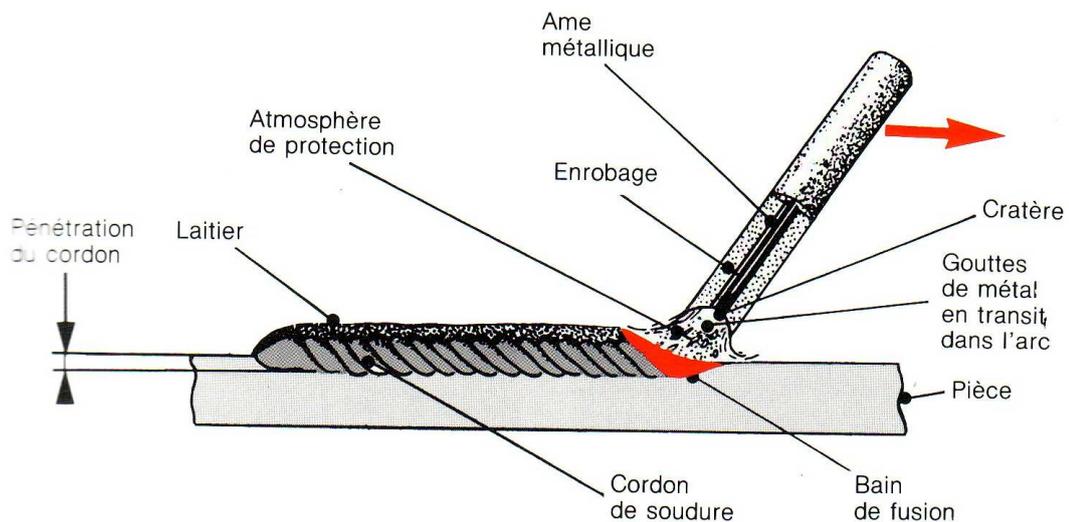


Fig. II. 2. Principe de la soudure à l'arc électrique

Le procédé de soudage à l'arc nécessite donc une alimentation électrique appelé générateur de soudage, qui peut être du courant continu (DC) ou du courant alternatif (AC). La pièce à souder est reliée à un pôle de ce générateur, appelé Cathode, et l'autre pôle du générateur

appelé anode, transporte le courant électrique et constitue l'élément de base de la torche. Donc L'opérateur manœuvre la torche pour amener l'électrode à frôler la surface de la pièce à souder pour créer un arc électrique, comme le montre la figure II.3

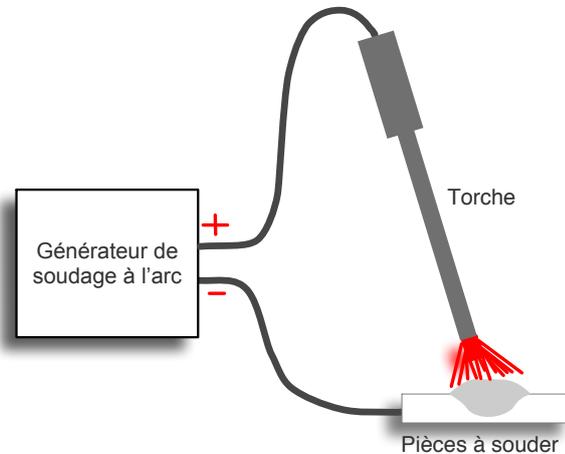


Fig. II. 3. Circuit électrique d'un procédé de soudage

II.3 Procédés de soudage à l'arc

Dans l'industrie de soudage, il existe plus de 70 procédés de soudage différents, et chacun correspond à une utilisation précise. Parmi lesquels on cite les plus courants, qui sont expliqués brièvement dans les paragraphes suivants :

- Soudage à l'arc avec électrode enrobée
- Soudage à l'arc sous gaz avec électrode de tungstène
- Soudage à l'arc sous gaz avec fil-électrode plein

II.3.1 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

Appelé aussi soudage manuel à la baguette (MMA). Ce procédé utilise une électrode fusible appelée baguette, constituée d'une âme métallique avec un revêtement contenant un mélange des produits chimiques, minéraux et de la poudre de fer, pour protéger la fusion pendant l'opération de soudage [36]. Le mélange de l'enrobage est généralement choisi en fonction du métal à souder. Le soudage consiste donc à créer un arc électrique entre la baguette et la pièce à souder, la chaleur de l'arc faisant fondre le revêtement de l'électrode qui forme un laitier protecteur [39].

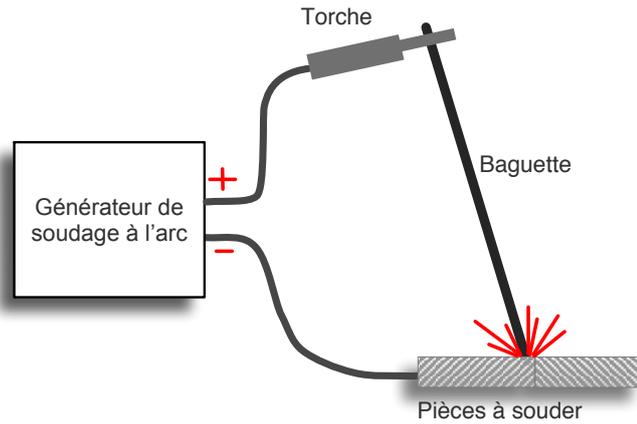


Fig. II. 4. Schéma de principe du soudage manuel avec électrode enrobée

Le métal de soudure est produit à la fois par l'âme métallique et la poudre de fer du revêtement. Ce procédé de soudage est le plus couramment utilisé sur les chantiers de construction, car il est peu affecté par le vent, contrairement à d'autres procédés nécessitant du gaz de protection, qui ne sont pas adaptés au vent. La figure II.4 représente un schéma de principe de soudage à l'arc avec une électrode enrobée.

II.3.2 Soudage à l'arc avec électrode réfractaire (TIG)

Appelé aussi soudage à l'arc sous gaz avec électrode de tungstène (GTAW), un procédé qui utilise une électrode de tungstène non fusible pour créer un arc électrique avec la pièce à souder. Cette électrode est protégée par un gaz inerte, tel que l'argon ou l'hélium, ou un mélange des deux, pour empêcher la dégradation de l'électrode [38]. Le gaz sert aussi à protéger le bain de fusion avec ou sans le métal d'apport. Le GTAW est un procédé qui permet au soudeur une grande précision. De ce fait, le procédé est plus couramment utilisé pour souder des parois minces [36].

La figure II.5 montre un schéma de principe du soudage TIG, le courant électrique provenant du générateur est envoyé à l'électrode de tungstène pour créer l'arc électrique à l'aide d'un dispositif d'amorçage.

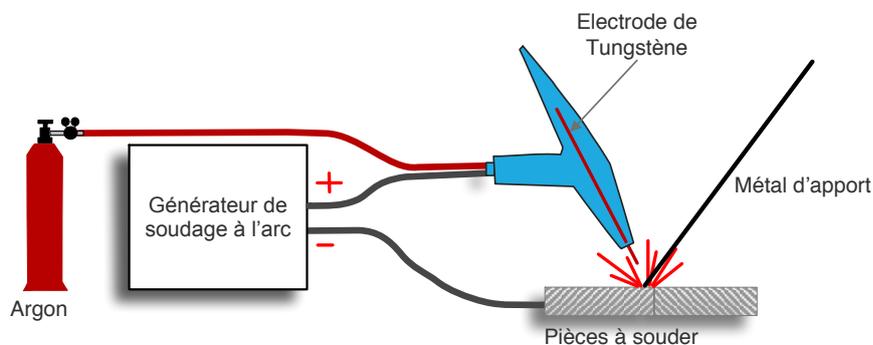


Fig. II. 5. Schéma de principe du soudage TIG

II.3.3 Soudage à l'arc semi-automatique (GMAW)

Appelé aussi Soudage à l'arc sous gaz avec fil-électrode plein. Ce procédé utilise une électrode à fil fusible continu avec un gaz de protection fourni de l'extérieur. La fusion est toujours obtenue grâce à l'arc électrique entre le fil électrode et la pièce à souder, en présence du gaz actif pour le procédé MAG, ou du gaz inerte pour le procédé MIG. La machine à souder est dotée d'un dévidoir de fil à souder, comme le montre la figure II.6, lors de l'appui sur la gâchette de la torche, le fil de soudure se déroule et avance à une vitesse programmée à l'avance [40].

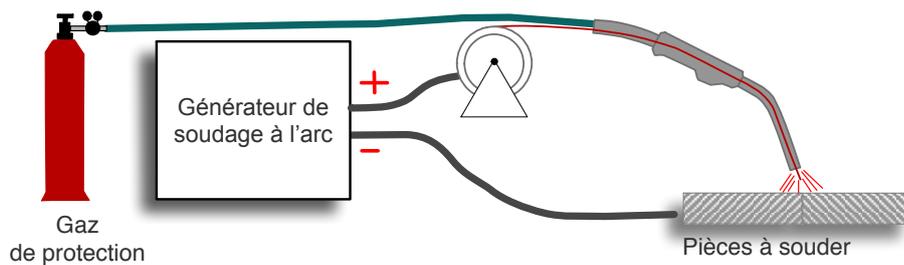


Fig. II. 6. Schéma de principe du soudage MIG/MAG

II.4 Paramètres électriques influençant sur la soudure

II.4.1 Tension de l'arc

L'arc de soudage est une décharge électrique entre les électrodes anode et cathode. Cette décharge est caractérisée par un fort courant et une faible tension. L'arc est en effet soutenu par la présence d'une colonne de gaz ionisée thermiquement appelée plasma, à travers laquelle, les électrons sont libérés, et circulent de la cathode vers l'anode. Du point de vue de la distribution de la tension de l'arc, un arc peut être divisé en trois régions, comme le montre la figure II.7 ; région anodique, région cathodique et la colonne de l'arc [39]. Cependant, les chutes de tension anodique et cathodique sont constantes et indépendantes du courant de soudage et de la tension de soudage. Elles peuvent représenter plus de la moitié de la tension totale de l'arc, bien qu'ils n'occupent qu'une partie négligeable de la longueur totale de l'arc [41].

La région anodique signifie que beaucoup de chaleur est évacuée. Lorsque la température baisse, une tension plus élevée est nécessaire pour maintenir l'ionisation de plasma. La perte de chaleur est principalement compensée par le fait que les électrons libres dans le plasma doivent accélérer dans un champ suffisamment puissant entre chaque collision, ce qui nécessite une chute de tension élevée. La région cathodique où la même quantité de chaleur est délivrée à la cathode, nécessite une tension supplémentaire pour la libération des électrons de la cathode. Cette énergie est récupérée sous forme de chaleur à l'anode lorsque les électrons se recombinent avec le métal. Il en résulte que plus de chaleur est générée à l'anode qu'à la cathode [39, 42].

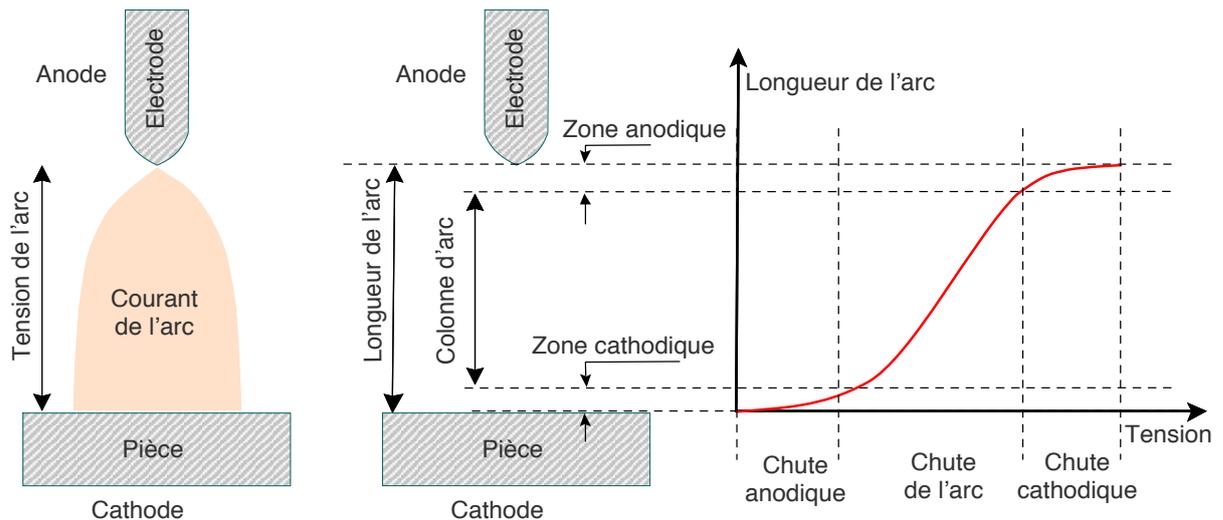


Fig. II. 7. Influence de la longueur de l'arc sur la tension de l'arc

Dans la colonne d'arc, la chute de tension dépend de beaucoup de paramètres tels que la longueur de l'arc, le courant électrique, la nature de la pièces à souder et le milieu gazeux ionisé. Lors du processus de soudage, il est important d'obtenir une petite longueur d'arc stable, sans court-circuiter les électrodes, et toute fluctuation de la longueur de l'arc affecte la résistance au flux de courant, ce qui affecte à son tour la tension de l'arc. L'augmentation de la longueur de l'arc provoque l'augmentation de la tension de l'arc, qui provoque par la suite l'échauffement de l'électrode [37].

II.4.2 Tension en circuit ouvert

La tension en circuit ouvert est la différence de potentiel entre l'électrode et la pièce à souder sans l'arc électrique. Le réglage de cette tension est important pour la stabilité de soudage, et particulièrement lorsque le type de générateur de soudage est à courant alternatif. Le choix d'une valeur optimale de tension en circuit ouvert dépend du type de métal de base (pièce à souder), la composition de revêtement d'électrode ou le métal d'apport, le type de courant de soudage (DC ou AC), la polarité, et le type de procédé de soudage etc.

Le soudage avec un courant AC a besoin d'une tension en circuit ouvert supérieur par rapport au soudage à courant DC, en raison de problème de stabilité de l'arc, vu le courant alternatif change continuellement sa direction et son amplitude, alors que pour le DC reste constant.

Il y a lieu aussi de noter que une valeur très faible de la tension en circuit ouvert peut ne pas amorcer l'arc ; et une valeur très élevée peut entraîner un choc électrique.

II.4.3 Courant de soudage

Généralement la valeur de courant de soudage détermine la quantité de métal de soudure qui se dépose pendant l'opération de soudage. En effet, Le courant de soudage affecte le profil de pénétration de la soudure ; plus le courant de soudage augmente, plus le profondeur de la

pénétration de la soudure augmente, et vice versa. La figure II.8 montre le profondeur de la pénétration de la soudure pour plusieurs valeurs du courant.



Fig. II. 8. Profondeur de pénétration pour quelques courants de soudage

II.4.4 Polarité de l'électrode

Pour les générateurs de soudage à courant DC, la polarité de l'électrode joue un rôle très important sur la qualité et la pénétration de la soudure. En effet, le dégagement de chaleur à l'anode est plus important qu'à la cathode ; cela est dû au fait que l'énergie nécessaire à la libération des électrons au niveau de la cathode est récupérée à l'anode sous forme de chaleur [39].

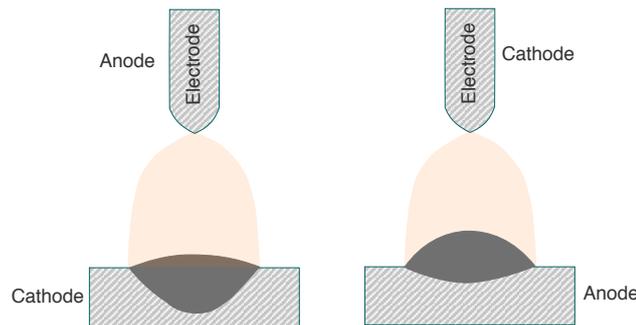


Fig. II. 9. Influence de la polarité sur la pénétration de la soudure

Si l'électrode est positive (anode), elle fond rapidement et le profondeur de la pénétration de la soudure augmente, comme illustré dans la figure II.9. En revanche, pour une électrode négative (cathode), les électrons circulent de l'électrode à la pièce de base, qui génère par la suite plus de chaleur que l'électrode, ce qui permet de diminuer la profondeur de pénétration.

II.5 Caractéristiques (U-I) de l'arc de soudage

Le phénomène de l'arc de soudage n'est pas simple à le modéliser mathématiquement car de nombreuses variables y figurent parmi lesquelles, pour s'en tenir aux plus significatives : la nature de l'atmosphère gazeuse siège de l'ionisation, la nature, la forme et la distance des électrodes, le courant de soudage, la tension, etc. Cependant, un arc de soudage peut être modélisé comme une relation entre la tension totale de l'arc U_a et le courant de soudage I_a , appelée caractéristique de l'arc de soudage.

La tension la plus élevée est la tension en circuit ouvert du générateur de soudage. Une fois que l'arc est amorcé, la tension chute rapidement, et le gaz entre les électrodes devient ionisé et électriquement conducteur, puis l'électrode chauffe et la taille de la colonne d'arc augmente. Au même temps, le courant de soudage augmente à mesure que la tension tombe jusqu'à ce qu'un point soit atteint au cours de laquelle la caractéristique U-I (relation entre la tension et le courant) devient linéaire et commence à suivre la loi d'Ohm, comme le montre la figure II.10.

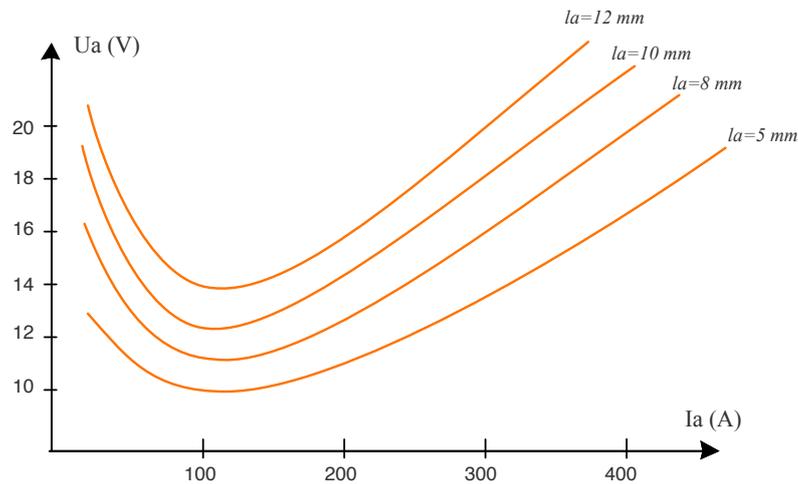


Fig. II. 10. Caractéristique (U-I) de l'arc de soudage pour différentes longueurs d'arc

Il est à noter que, tout changement au niveau de la longueur de l'arc (la distance entre les deux électrodes) produit un changement de la caractéristique U-I de l'arc.

En se basant sur la description des trois chutes de tension (chute anodique, chute cathodique et la chute de l'arc réel) citée au paragraphe II.4.1, la caractéristique de l'arc de soudage peut être décrite comme suit [38, 41]:

$$U_a = U_0 + R_a I_a + E_a l_a$$

La tension U_0 représente la chute de tension dans les deux zones de de l'arc (zone anodique et cathodique), qui est presque constante et ne dépend pas du courant de soudage. Le terme $R_a I_a$ représente la chute de tension de la colonne d'arc, qui est une caractéristique linéaire résistive, liée à la résistance de cette colonne et le courant de soudage. Par contre, le terme $E_a l_a$ représente une chute de tension additionnelle au niveau de la colonne d'arc, mais liée au changement de la longueur d'arc l_a .

II.6 Caractéristiques (U-I) des générateurs de soudage

Tous les générateurs de soudage à l'arc électrique ont deux types de caractéristiques (U-I) à savoir, la caractéristique statique et la caractéristique. La caractéristique statique nécessite de fixer au préalable l'un des grandeurs tension ou courant, et joue sur la variation de l'autre. Par contre, dans la caractéristique dynamique, la tension et le courant sont soumis à un contrôle permanent.

II.6.1 Caractéristiques (U-I) statiques

Cette caractéristique est établie en mesurant en permanence :

- Le courant pour le maintenir constant à travers la variation de la tension ; cette caractéristique est appelée à courant constant ;
- La tension pour la maintenir constante à travers la variation du courant ; cette caractéristique est appelée à tension constante.

a) Caractéristiques (U-I) à courant constant

Les générateurs à caractéristique (U-I) à courant constant sont utilisés lorsque la longueur de l'arc est contrôlée par l'opérateur (soudeur) ; ils conviennent donc aux procédés de soudage avec électrode enrobée (SMAW) et à électrode en tungstène (TIG) [39, 42].

Pour maintenir un courant constant, la variation de la longueur d'arc (puisque au cours de soudage manuel, la longueur d'arc ne cesse de changer et l'opérateur ne peut pas la mettre constante) se traduit par une variation significative de la tension due à la forte pente de la caractéristique du générateur ; mais elle n'affecte pas beaucoup le courant de soudage, comme le montre la figure II.11. Ce qui présente un avantage pour l'opérateur d'avoir un arc stable et une bonne qualité de soudure, étant donné qu'il est essentiellement le courant de soudage, qui détermine des caractéristiques telles que la pénétration et la consommation d'électrode.

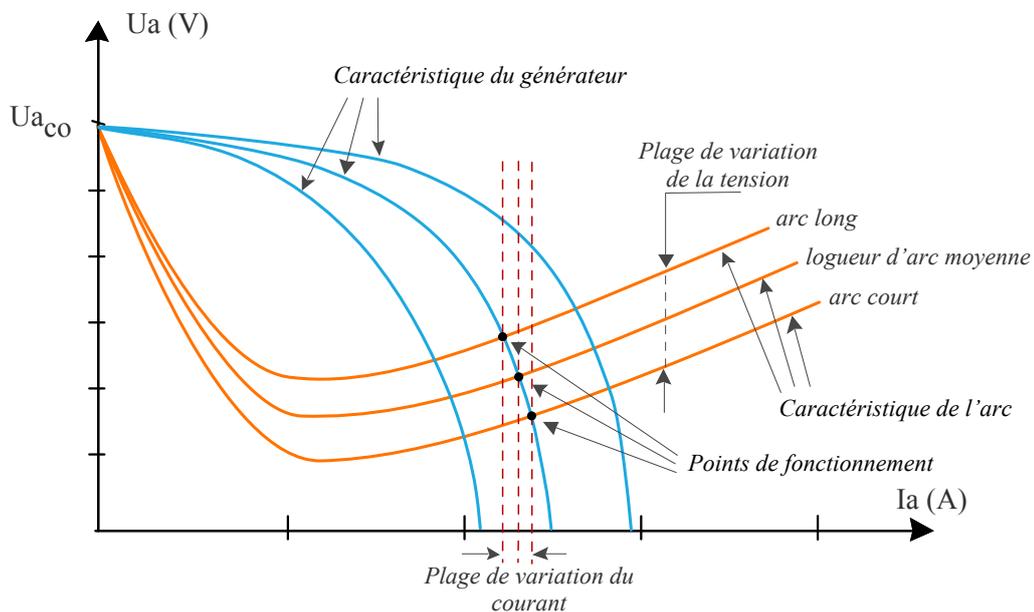


Fig. II. 11. Caractéristique d'un générateur à courant constant

b) Caractéristiques (U-I) à tension constante

C'est une caractéristique plate à légère pente négative, illustrée par la figure II.12. Dans un générateur à tension constante, un petit changement de longueur de l'arc provoque une grande fluctuation sur le courant de soudage. Donc, pour ce type, le contrôle de la longueur de l'arc est une nécessité pour réussir le soudage et avoir une soudure de qualité. Donc il convient

aux procédés de soudage semi-automatique comme le MIG/MAG, et le FCAW (soudage submergé sous flux) [37]. Dans ces procédés, la vitesse d'alimentation du fil qui alimente l'électrode est contrôlée par la tension à travers la variation du courant. Si la vitesse du fil est constante, et si il y a moins de fusion du fil, donc l'extrémité du fil se rapproche du bassin de soudure. Par conséquent, la longueur de l'arc diminue et la tension chute légèrement, mais le courant augmente brutalement. Donc, il aura plus de fusion, ce qui permet d'augmenter la consommation du fil ; et par la suite, la longueur de l'arc augmente ; puis la tension augmente ; puis le courant diminue ; et à nouveau la fusion diminue. A la fin, le procédé va se stabiliser sur une longueur d'arc constante et appropriée à la vitesse d'alimentation du fil (autorégulation de la longueur de l'arc), et une tension presque constante, avec un courant optimal.

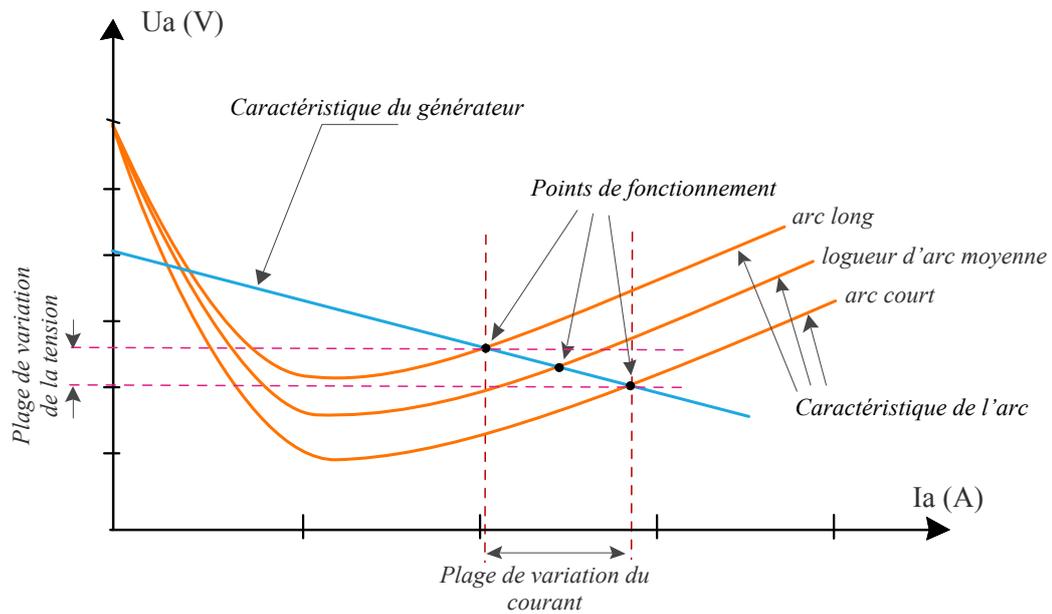


Fig. II. 12. Caractéristique d'un générateur à tension constante

II.6.2 Caractéristique (U-I) dynamique

C'est la variation transitoire de la tension et du courant pendant le fonctionnement sur la caractéristique statique, ou bien pendant les phases du démarrage et de l'extinction .etc. Pour faire face à ces conditions, le générateur de soudage doit avoir de bonnes caractéristiques dynamiques (fournir rapidement des conditions optimales de tension et courant) pour obtenir un arc stable et lisse [13].

II.7 Classification des générateurs de soudage à l'arc

Dans l'industrie de soudage à l'arc, il y a une variété de générateurs de soudage à l'arc basés sur différentes conceptions. Certains d'entre eux sont en plein développement comme le type appelé onduleur de soudage qui est basé sur les alimentations à découpage. Certains d'autres comme les générateurs de soudage à transformateur et les génératrices de soudage sont déjà limités par le développement, et presque abandonnés. Généralement, les générateurs de

soudage à l'arc sont divisées en deux grandes catégories à savoir, les générateurs de soudage statiques et les générateurs de soudage rotatifs, comme indiqué dans la figure I.13 [43].

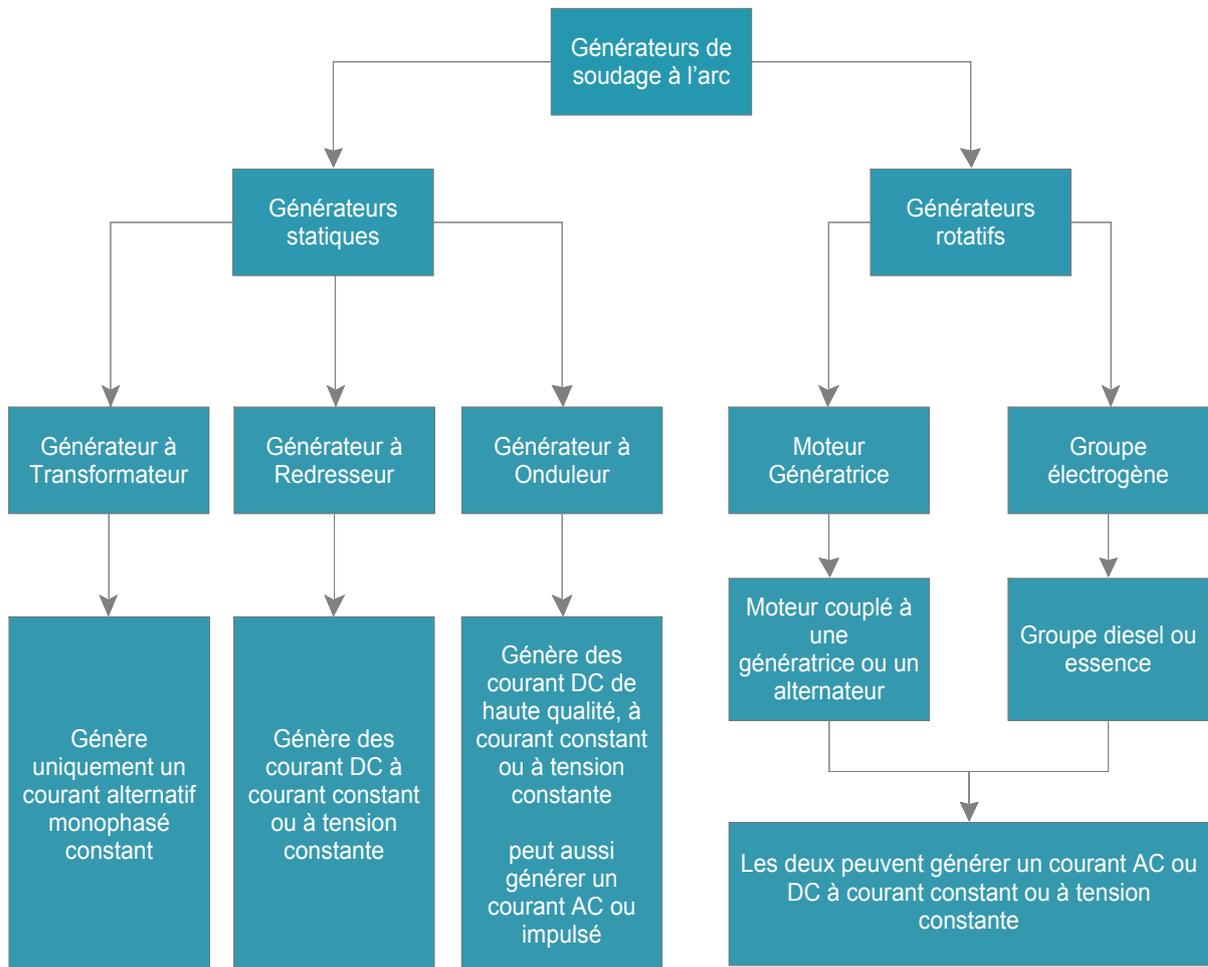


Fig. II. 13. Classification des générateurs de soudage à l'arc

Avant la fin du 19ème siècle, le soudage à l'arc n'a pas été développé à cause de manque de sources de courant appropriées. Jusqu'à 1905, un premier générateur de soudage construit d'une génératrice à courant continu, entraînée par un moteur asynchrone, présentait des caractéristiques appropriées pour le soudage. En 1920, les transformateurs de de soudage sont apparus et devenus très populaire, à cause de prix réduit. A la fin des années 1950, les redresseurs ont été introduits pour le soudage statique à courant DC. Cependant, la révolution la plus remarquable a été en 1980 avec l'apparition des onduleurs de soudage, basés sur des transistors commandés. La figure II.14 représente un historique des différents générateurs de soudage à l'arc [39].

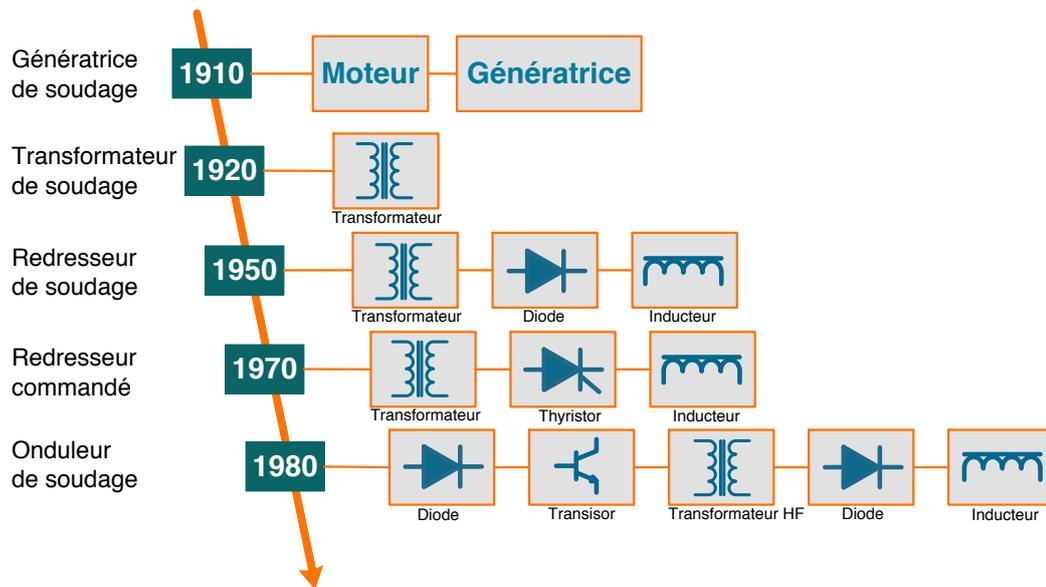


Fig. II. 14. Historique des différentes conceptions des générateurs de soudage à l'arc

II.7.1 Générateurs de soudage statiques

Les générateurs de soudage de type statique sont généralement basés soit sur un transformateurs, soit sur des convertisseurs statiques d'électronique de puissance. Ce type nécessite la disponibilité du réseau électrique de distribution.

a) Transformateur de soudage

Appelés aussi transformateurs de soudage, sont les premiers générateurs de soudage à l'arc, inventés vers 1920 ; ils sont basés sur un transformateur qui abaisse la tension d'entrée en une tension utilisable pour le processus de soudage comme le montre la figure II.15. Cependant le transformateur génère uniquement un courant alternatif, donc ne peut être utilisé pour les application qui requière un courant de soudage continu DC [43]. En. Plus, ce type présente d'autres inconvénients à savoir la taille grande du transformateur, non commandé par les techniques de contrôle avancés, et les pertes, etc.

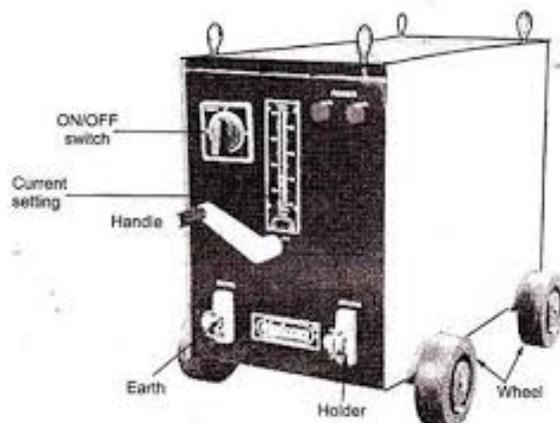


Fig. 11 Welding Transformer

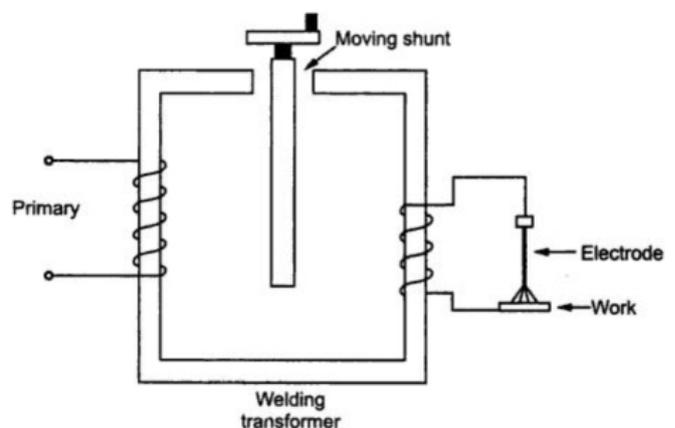


Fig. II. 15. Générateur de soudage à transformateur

b) Redresseur de soudage

Appelés également redresseurs de soudage ; ils ont été introduits au milieu des années 1970. Ils fournissent du courant soudage continu (DC) et du courant alternatif (AC) selon le type de soudage, à partir d'une source d'alimentation monophasée ou triphasée. Le principe de ce type consiste en un transformateur en cascade avec un redresseur à diode pour pouvoir fournir un courant de soudage continu. Ils trouvent leur application dans le soudage d'électrodes enrobées, le soudage d'électrodes non fusibles et le soudage avec des fils pleins ou fourrés [13]. La figure II.16 montre un redresseur de soudage à l'arc. Avec le temps, ce type de générateurs de soudage a été amélioré par l'utilisation des thyristors et transistors.

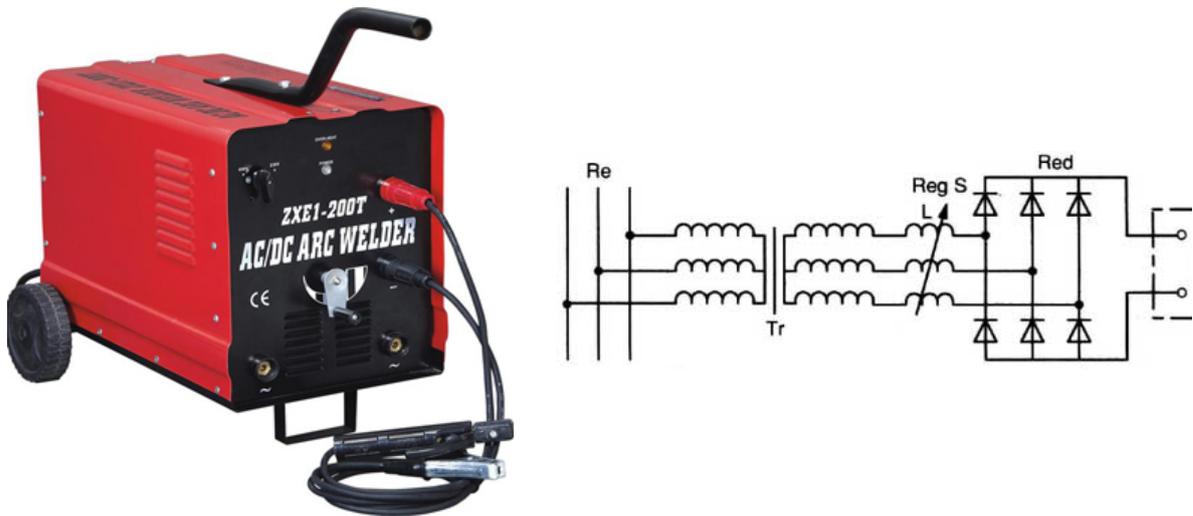


Fig. II. 16. Générateur de soudage à redresseur

c) Onduleur de soudage

Appelé aussi inverter de soudage ; ils ont été introduits dans les années 1970, et sont connus un succès avec l'apparition des convertisseurs de puissance et leurs composants de commutation de haute gamme comme l'IGBT. Le principe de ce type est d'augmenter la fréquence de fonctionnement au-delà de 5kHz afin de réduire la taille de transformateur et le poids du poste à souder[13, 43].



Fig. II. 17. Générateur de soudage de type onduleur

De plus, ces générateurs de soudage sont plus performant grâce à la commandabilité des composants de commutation avec l'utilisation des techniques de contrôle plus avancés. Ils offrent aussi la protection contre les surcharges et la paramétrage de courant et de tension. Actuellement, ils sont les plus demandés dans le marché de soudage à l'arc. Leurs applications incluent les processus GTAW, GMAW, SMAW, FCAW, etc. Un exemple de ce type de générateurs est donné par la figure II.17.

La figure II.18 montre un schéma type d'un onduleur de soudage. Tout d'abord, la tension alternatif du réseau (mono ou triphasé) qui est un peu élevée entre 220 et 380 V, avec un courant modéré allant de 20 A jusqu'à quelque dizaine d'ampère, est redressée en tension continue, ensuite filtrée, et envoyée à étage de commutation pour la découper à haute fréquence. La commutation peut atteindre 200 kHz. Ensuite, la tension à haute fréquence est envoyée au transformateur spécial de type haute fréquence pour abaisser la tension et augmenter le courant ; et à la sortie un inducteur est utilisé pour lisser le courant.

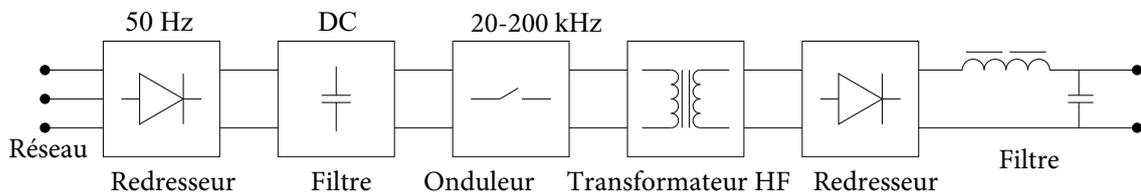


Fig. II. 18. Diagramme d'un générateur de soudage de type onduleur

II.7.2 Générateurs de soudage rotatifs

Sont des générateurs de soudage basés sur des machines tournantes telles que la machine à courant continu, la machine asynchrone et les moteurs thermiques, et peuvent être divisés en deux catégories à savoir, les génératrices de soudage et les groupes de soudage :

a) Génératrices de soudage

Le principe de ce type est basé sur une génératrice électrique (à courant continu ou un alternateur) entraînée par un moteur asynchrone pour produire le courant souhaité, comme le montre la figure II.19. Ces machines de soudage produisent des qualités de soudure supérieures [42]. Cependant, ils nécessitent un entretien fréquent ; pour cette raison qu'ils sont abandonnés. La figure II.20 présente une ancienne génératrice de soudage.

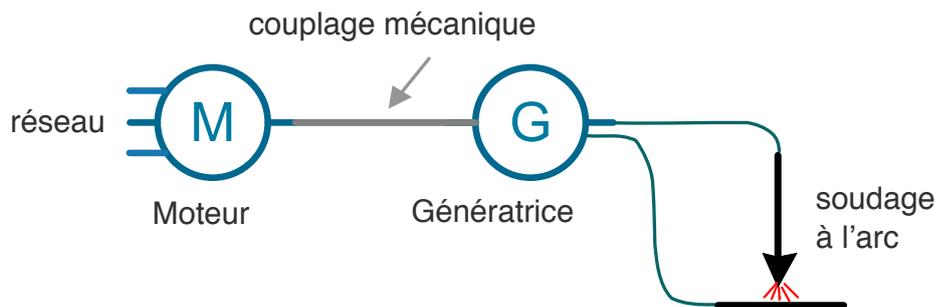


Fig. II. 19. Diagramme d'une génératrice de soudage

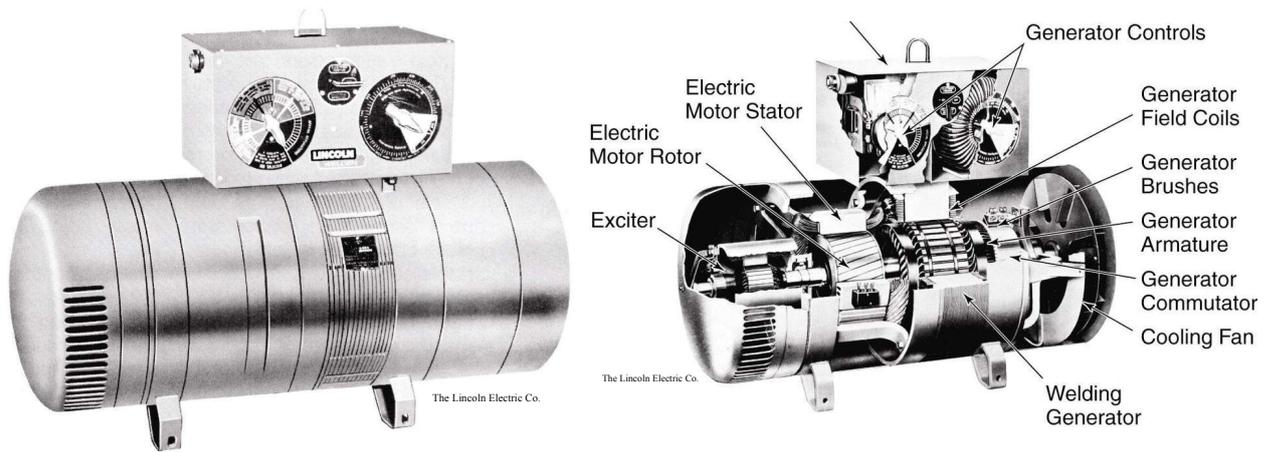


Fig. II. 20. Générateur de soudage à base d'une génératrice DC

b) Groupe électrogène de soudage

Un moteur thermique à essence ou diesel est couplé mécaniquement à une génératrice à courant continu ou un alternateur asynchrone pour produire la puissance de soudage souhaitée, comme indiqué dans les Figures II.21 et II.22. Les groupe d'électrogène de soudage (appelé sur le marché Genset Welding Machine) sont largement utilisés dans les sites isolés qui ne disposent pas du réseau électrique de distribution.



Fig. II. 21. Générateur de soudage à base de groupe électrogène

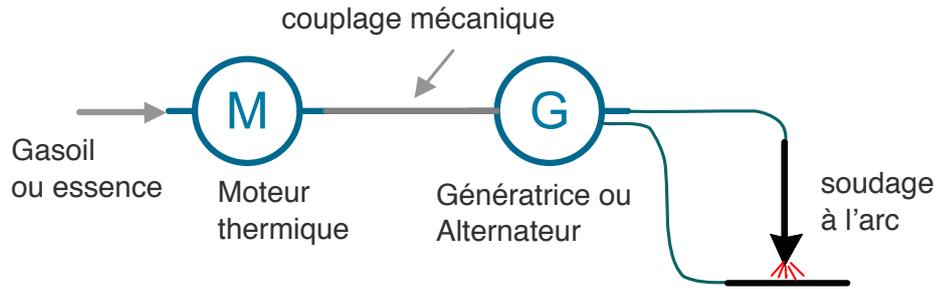


Fig. II. 22. Diagramme de groupe électrogène de soudage

II.8 Typologies des onduleurs de soudage

Aujourd'hui, tous les onduleurs de soudage à l'arc sont basés sur les schémas des alimentations à découpage, et notamment les montages symétrique à transformateur haute fréquence. Ces onduleurs de soudage offrent beaucoup d'avantages :

- Poids réduit ;
- Plus petite taille ;
- Efficacité accrue ;
- Moins de pertes ;
- Large plage de tension d'entrée ;
- Coûts réduits.

Dans les montages symétriques, la tension appliquée au transformateur est alternative, ainsi que le flux et l'induction dans le circuit magnétique. Le transformateur est mieux utilisé ; à puissance donnée, son volume et son coût peuvent être réduits [16, 44]. Mais il faut au moins deux transistors. Vu le fort courant fourni à la sortie de l'onduleur de soudage, les montages symétrique à transformateur d'isolation sont plus adaptés aux application de soudage et offrent une meilleure optimisation du transformateur.

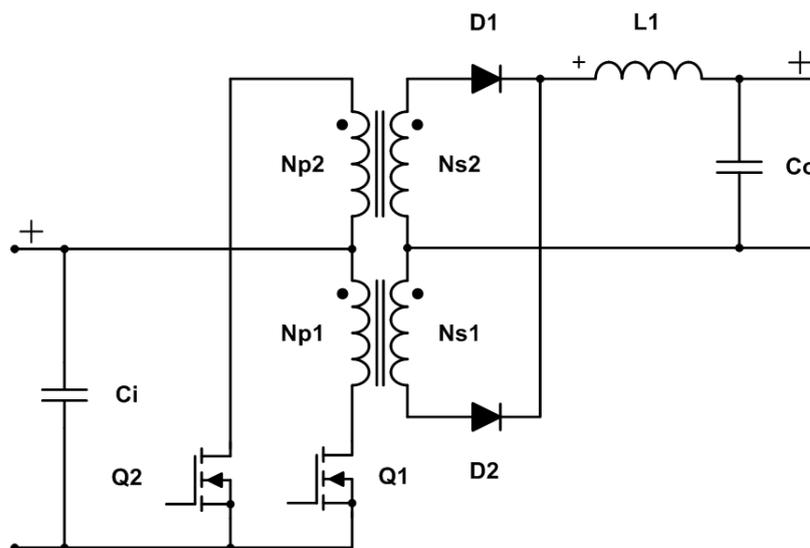


Fig. II. 23. Onduleur de soudage à base de la topologie Push-Pull

Il existe cinq catégories principales de topologies pour les onduleur de soudage, à savoir : Flyback, Forward, Half-Bridge, Full-Bridge et Push-Pull. Sur ces catégories, seules deux d'entre elles sont généralement recommandées pour les applications de forte puissance à savoir, le Full-Bridge et le push-pull qui sont illustrés respectivement par les figure II.23 et II.24.

Le type de Push-Pull donné par la figure II.23 nécessite un transformateur à point milieu au primaire et au secondaire. L'utilisation d'un redresseur très rapide à deux diodes au secondaire limite la chute de tension due au redresseur puisqu'elle se limite à une seule chute de tension de diode [44].

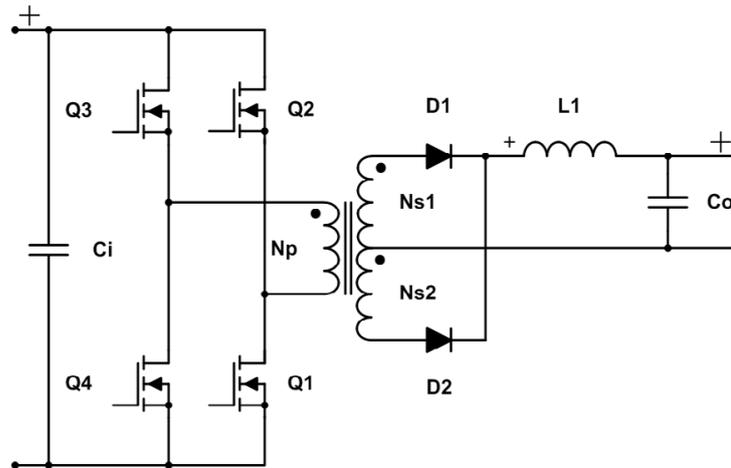


Fig. II. 24. Onduleur de soudage à base de la topologie Full-Bridge

Les inverters à topologie Flyback, présenté par la figure II.25 ne peuvent pas être utilisés largement car leur capacité de courant de sortie est limitée.

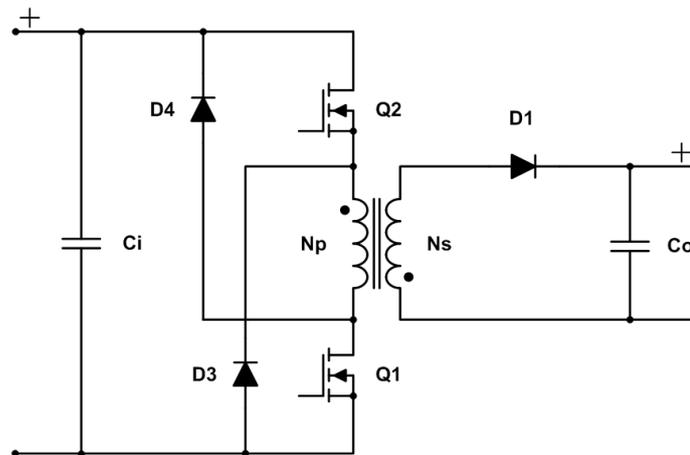


Fig. II. 25. Onduleur de soudage à topologie Flyback

Par contre, les onduleurs à topologie Half-Bridge, qui est présenté par la figure II.26, sont difficiles à contrôler en mode générateur de courant et par conséquent, ils nécessitent des circuits supplémentaires pour éviter la saturation du transformateur.

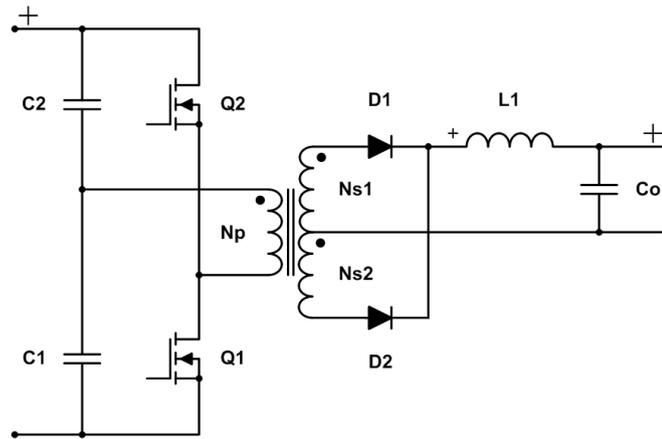


Fig. II. 26. Onduleur de soudage à topologie Half-Bridge

Les onduleurs à topologie Forward (comme le montre la figure II.27) ont un niveau de puissance limité car ils ne peuvent pas piloter le transformateur que dans une direction et doivent limiter le rapport cyclique à 50% pour permettre au transformateur d'évacuer sa énergie magnétique [45, 46].

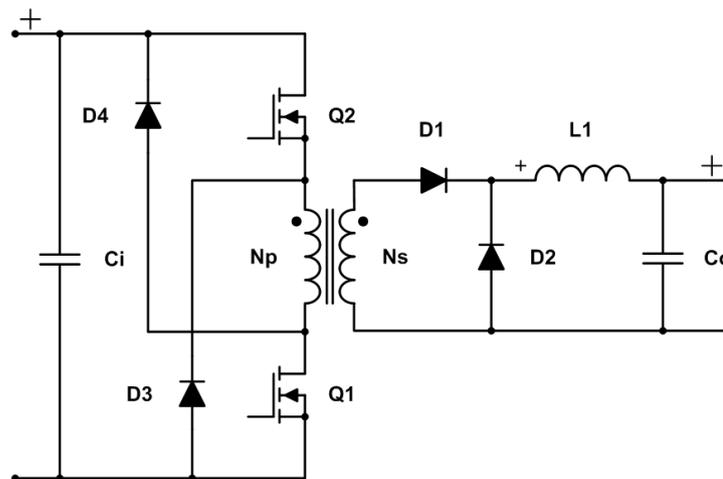


Fig. II. 27. Onduleur de soudage à topologie Forward

II.9 Étude de cas (Onduleur de soudage Half-Bridge)

La figure II.28 représente un onduleur de soudage à topologie Half-Bridge; il est alimenté par une source électrique monophasée, 220 V, 50 Hz. L'onduleur de soudage doit tout d'abord redresser la tension alternative du réseau, puis la filtrer, afin d'avoir une tension DC constante. Le filtrage est fait par deux condensateurs identiques, qui servent aussi à diviser la tension constante à deux niveaux de tension égaux. L'onduleur utilisé est à demi pont commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), et composé de deux transistors IGBT. La sortie de l'onduleur est connectée à un transformateur à haute fréquence à point milieu afin d'abaisser la tension et créer deux niveaux de tension inversés. Le transformateur permet également de réduire sa taille et son poids et offre une isolation galvanique. Un redresseur à diode rapide est utilisé pour convertir la tension du transformateur

en tension continue. Enfin, un circuit de filtrage composé d'une bobine de lissage de courant est nécessaire pour le soudage [18, 47].

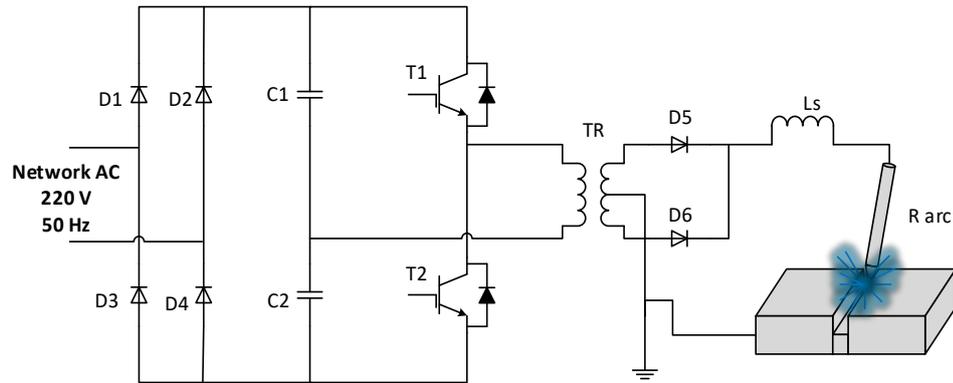


Fig. II. 28. Onduleur de soudage Half-Bridge

On désire à travers cet onduleur de soudage de générer un courant DC constant au cours de l'opération de soudage ; autrement dit, contrôler l'arc de soudage. Pour ce faire, un système de régulation du courant est nécessaire, qui peut être basé sur un régulateur conventionnel PI. la chaine de régulation donc mesure le courant de soudage à l'aide d'un capteur à effet Hall, puis le comparer avec le courant de consigne. L'erreur entre les deux courants est envoyée au régulateur PI, qui par la suite génère un signal MLI pour le transmettre au driver d'IGBT. Un bloc digramme de cette régulation est donné par la figure II.29.

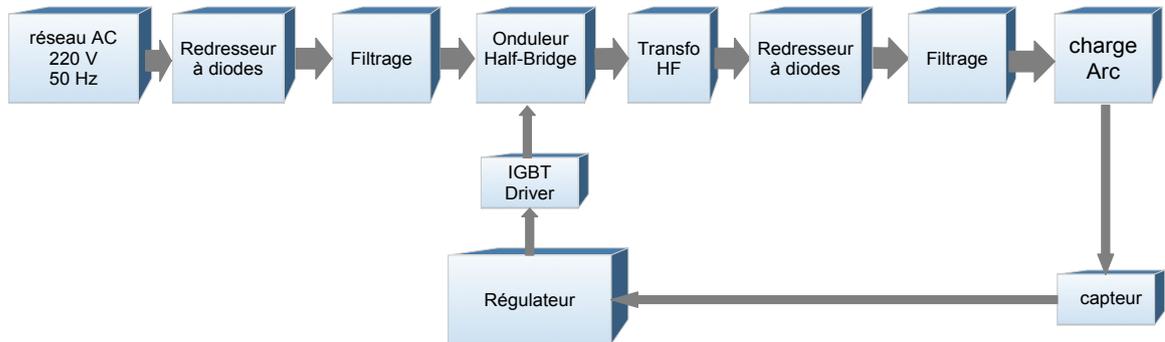


Fig. II. 29. Bloc diagramme de la chaine de régulation

II.9.1 Les équations de la tension de l'arc

La topologie Half-Bridge impose que les deux transistors IGBT T1 et T2 fonctionnent en alternance avec un rapport cyclique α strictement inférieur à 50% afin de laisser un temps mort entre les deux IGBT. Les diodes D5 et D6 redressent la tension, et servent également à libérer l'énergie emmagasinée dans l'inductance en cas d'ouverture des deux IGBT. En effet, un cycle de commutation de cette topologie comprend quatre étapes, comme les montre la figure II.30 et II.31 ; et peuvent être décrites en équations comme suit [18]:

$$\begin{cases} V_{arc} = \frac{V_{in}}{2m} = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + Ri_{arc} & T_1 \text{ est fermé} \\ V_{arc} = 0 = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + Ri_{arc} & T_1 \text{ est ouvert} \\ V_{arc} = \frac{V_{in}}{2m} = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + Ri_{arc} & T_2 \text{ est fermé} \\ V_{arc} = 0 = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + Ri_{arc} & T_2 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad \text{II.1}$$

avec

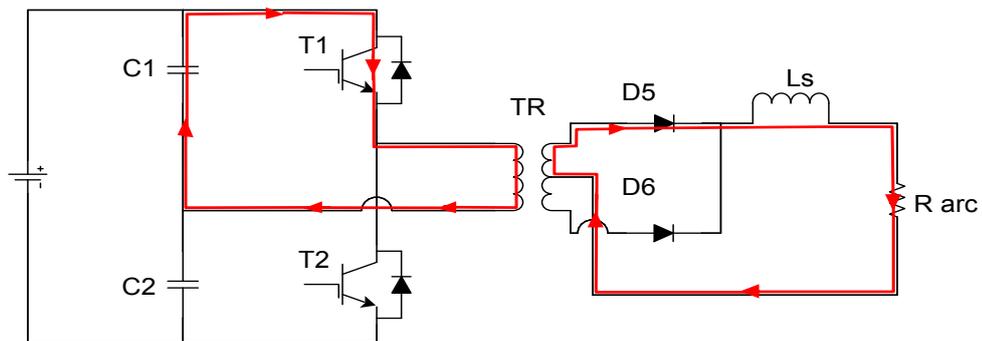
V_{arc} : la tension redressée appliquée aux condensateurs

m : Le rapport de transformation

R : La résistance équivalente de l'arc

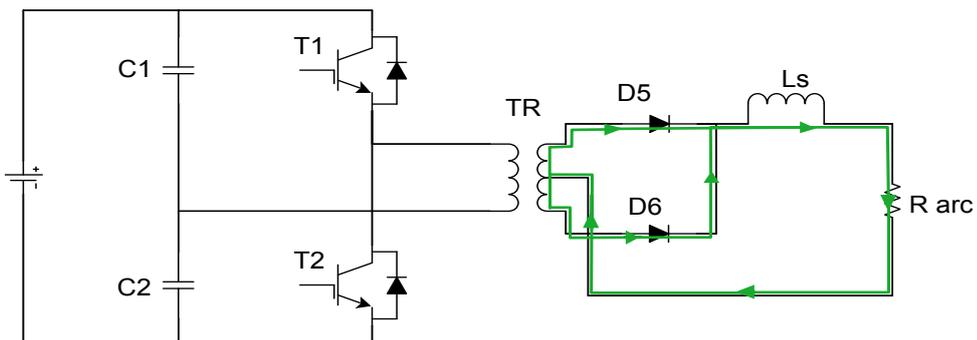
Les deux Transistors T1 et T2 ont la même période de conduction t_{on} , et même rapport cyclique qui égale à :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T}$$



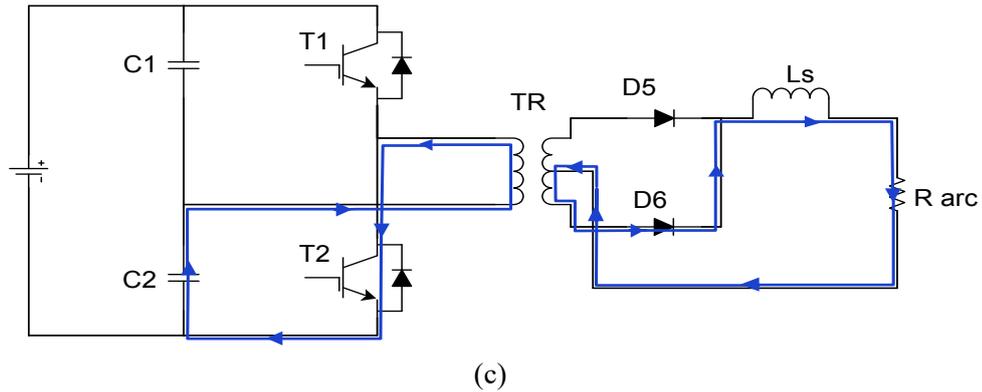
(a)

T1 passant et T2 bloqué, C1 fournit l'énergie au transformateur, D5 passante, D6 bloquée



(b)

T1 et T2 bloqués, Ls restitue l'énergie emmagasinée à Rarc, D5 et D6 passantes



T1 bloqué et T2 passant, C2 fournit l'énergie au transformateur, D6 passante, D5 bloquée

Fig. II. 30. Les phases de commutation de l'onduleur Half-Bridge

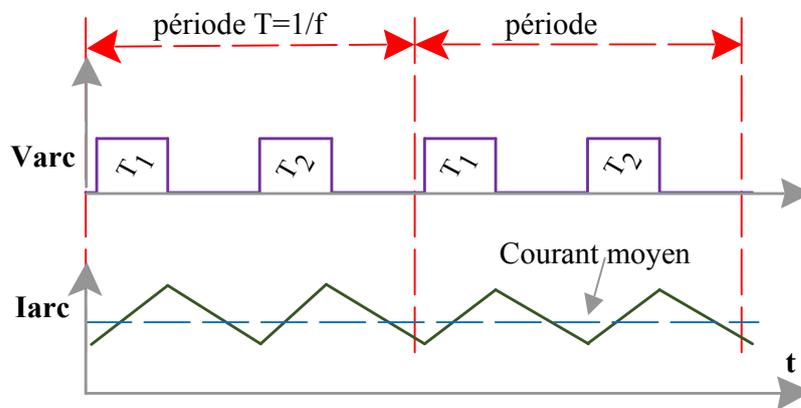


Fig. II. 31. Tension et courant de l'arc

II.9.2 Résultats de simulation

L'onduleur de soudage à topologie Half-Bridge étudié dans ce chapitre a été modélisé et simulé sous environnement Matlab/Simulink pour connaître le comportement du courant de soudage à la sortie. Les paramètres utilisés sont les suivants :

Tension du réseau: 220 V & 50 Hz monophasé.

Rapport de transformation: 50/110.

Charge d'arc: 0.1 Ω , Inductance: 2000 uH

Variation de charge d'arc: jusqu'à 30%.

Courant de l'arc maximal: 200 A.

Rapport cyclique : 0 - 42%.

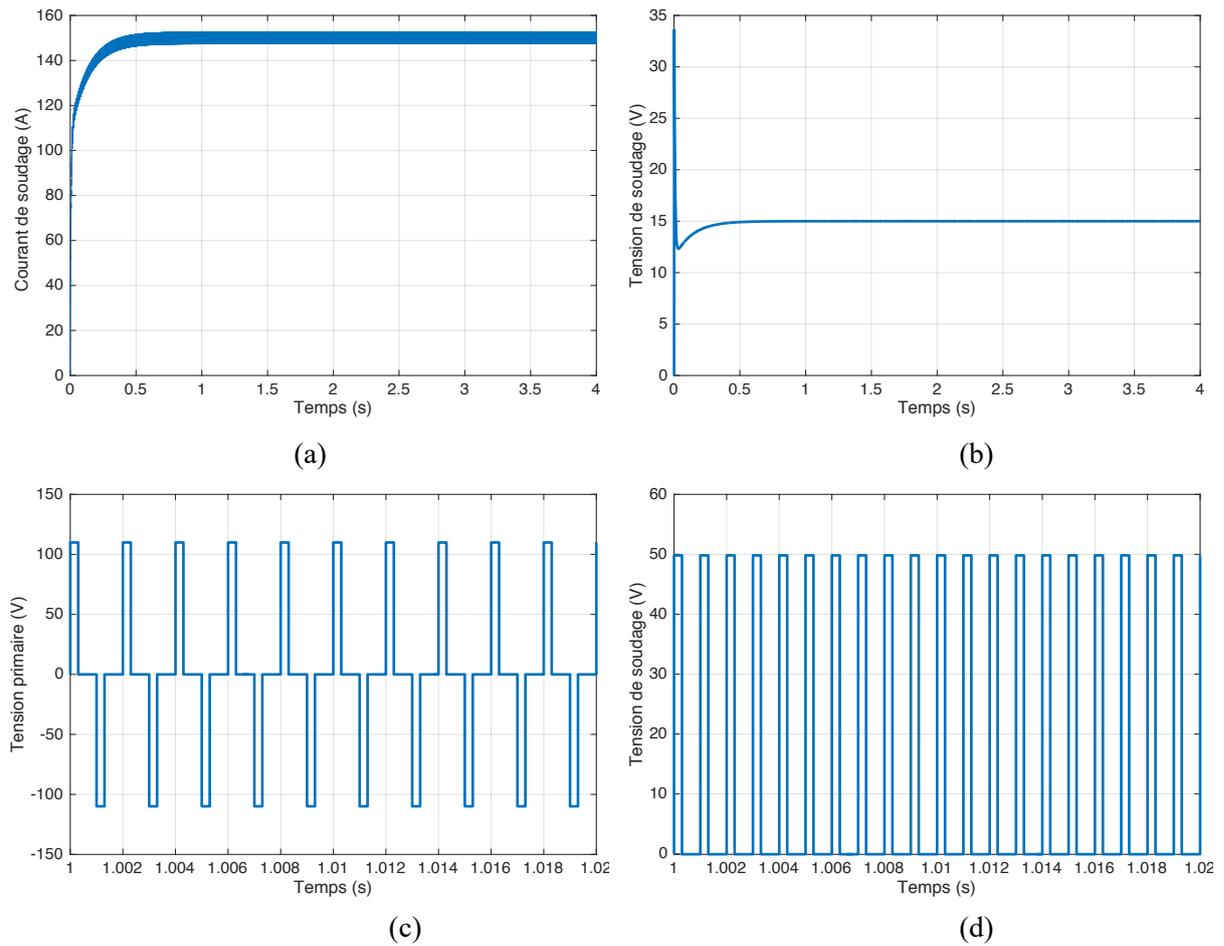


Fig. II. 32. Résultats de simulation avec $R=0.1\Omega$, $\Delta R=0\%$, (b) est la valeur moyenne de la tension de soudage

Un courant de l'arc de 150 A a été imposé sur le procédé, les résultats de la simulation montrent que le courant de soudage est stable et suit la valeur du courant de référence comme illustré par la figure II.29, grâce au régulateur conventionnel PI choisi.

Une variation de 30% sur la résistance de l'arc comme source de perturbation a été appliquée durant la procédure de soudage, tout en gardant le même courant imposé initialement. Les résultats de la simulation montre que le courant de l'arc est stable avec une petite ondulation d'amplitude de 10 A autour de la valeur de consigne, comme indiqué sur la figure II.30.

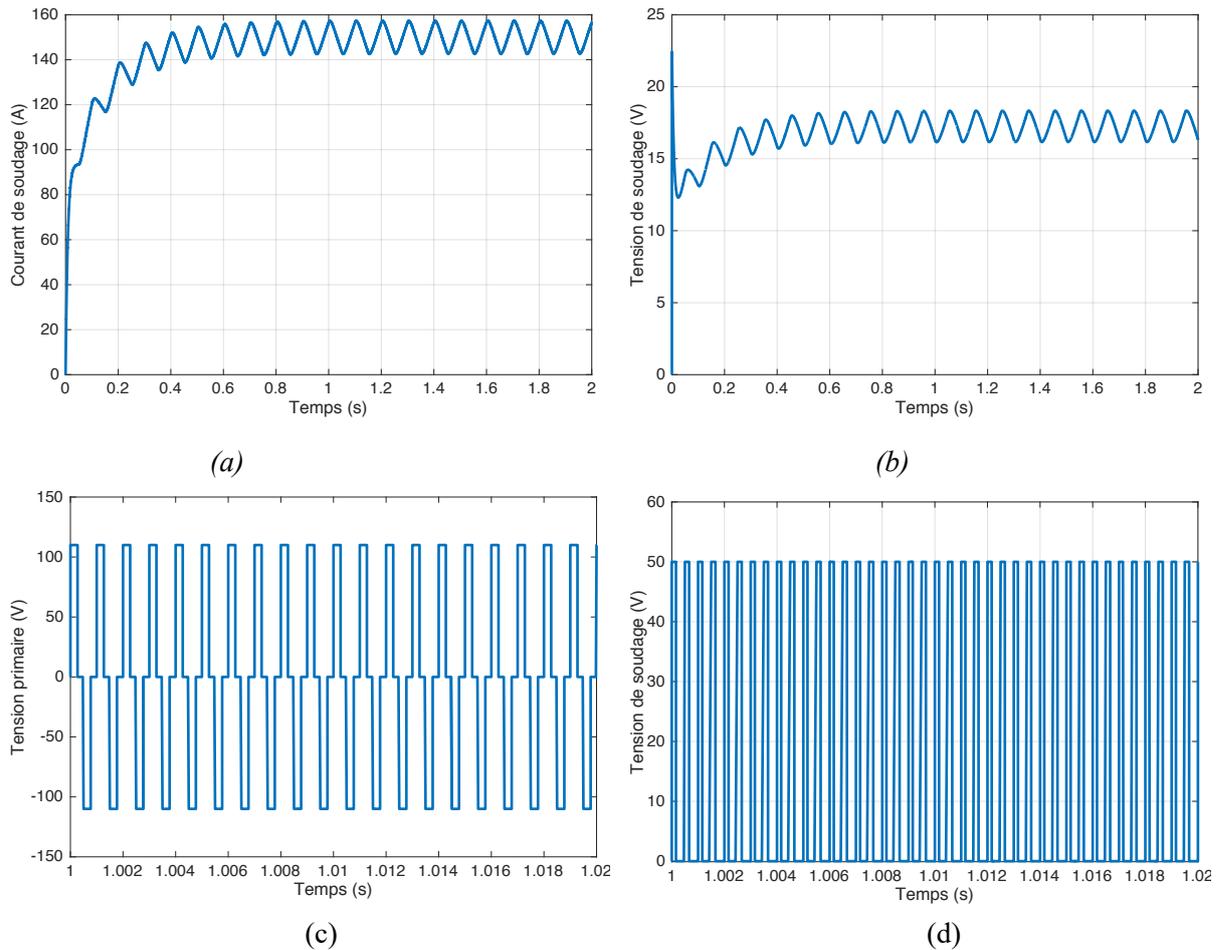


Fig. II. 33. Résultats de simulation avec $R=0.1\Omega$, $\Delta R=30\%$, (b) est la valeur moyenne de la tension de soudage

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à la description de l'ensemble des éléments liés au soudage à l'arc, à savoir, le phénomène de l'arc électrique et sa caractéristique électrique, les principaux procédés de soudage à l'arc et les différentes caractéristiques des générateurs de soudage. La deuxième partie a été consacrée sur le principe de fonctionnement de différents générateurs de soudage, notamment les onduleurs de soudage avec les topologies les plus utilisées. A la fin, un onduleur de soudage à topologie Half-bridge a été étudié, modélisé et simulé par Matlab.

Étude et modélisation de la chaîne éolienne à base de GSAP

III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, On s'intéresse essentiellement à l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents multi-pôles à entraînement direct. Dans la première partie, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance et de couple, et la limite de Betz. La deuxième partie est consacrée à la modélisation de tous les éléments de la chaîne éolienne. La dernière partie traite l'optimisation de la puissance extraite du vent par l'utilisation de l'une des méthodes de poursuite de la puissance maximale.

III.2 Énergie cinétique du vent

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ et animée d'une vitesse v , comme illustré dans la figure III.1, s'écrit comme suit [27]:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad \text{III.1}$$

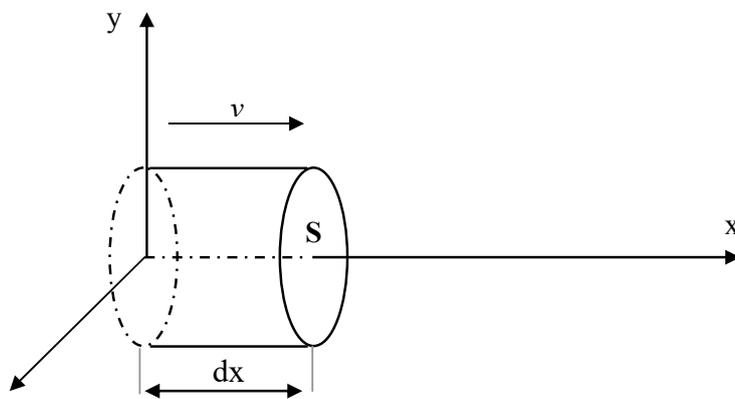


Fig. III. 1. Colonne d'air en déplacement

La puissance d'air en déplacement P_{air} est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps comme suit : (avec $dx = vdt$)

$$P_{air} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad \text{III.2}$$

III.3 Conversion aérodynamique

La turbine (ou le capteur éolien) est un dispositif de conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sous forme de rotation. D'après loi de Betz [27], le capteur éolien ne pourra jamais convertir toute l'énergie cinétique du vent. En effet, un maximum théorique de 16/27 de l'énergie cinétique contenue dans le vent peut être convertit en énergie mécanique exploitable.

Donc, la puissance extraite du vent par la turbine peut être définie comme suit [24]:

$$P_m = C_p \cdot P_{air} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad \text{III.3}$$

C_p : est le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance ;
 $S = \pi R^2$ est la surface balayée par les pales de la turbine, et R est le rayon de la turbine.

On déduit aisément l'expression du couple aérodynamique :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{1}{2\omega_m} \rho S v^3 C_p \quad \text{III.4}$$

ω_m est la vitesse de rotation de la turbine.

III.3.1 Vitesse spécifique (Tip Speed Ratio)

On définit la vitesse spécifique λ comme étant le rapport entre la vitesse linéaire (tangentielle) en bout des pales de la turbine et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{v} \quad \text{III.5}$$

III.3.2 Coefficient de puissance

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. il dépend essentiellement de la caractéristique aérodynamique des pales. Aussi, il est variable en fonction de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage des pales β , et ce pour pouvoir contrôler la puissance extraite du vent.

Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature pour modéliser la caractéristique aérodynamique de la turbine [3]. Dans cette thèse, l'expression empirique suivante est utilisée :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \quad \text{III.6}$$

Les coefficients $c_1 - c_6$ peuvent être différents d'une turbine à d'autre, dans cette thèse, nous avons utilisé les valeurs données par le tableau suivant :

Tableau 3. Coefficients de la caractéristique de coefficient de puissance

c1	c2	c3	c4	c5	c6
0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

et λ_i est donné par l'expression suivante [3] :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{III.7}$$

A partir de l'expression du coefficient de puissance, on peut définir à nouveau la puissance extraite et le couple à l'arbre de la turbine comme suit :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad \text{III.8}$$

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_c(\lambda, \beta) \quad \text{III.9}$$

avec $C_c(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$ est le coefficient du couple aérodynamique

la caractéristique des coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse spécifique et l'angle de calage est illustrée par la figure III.2.

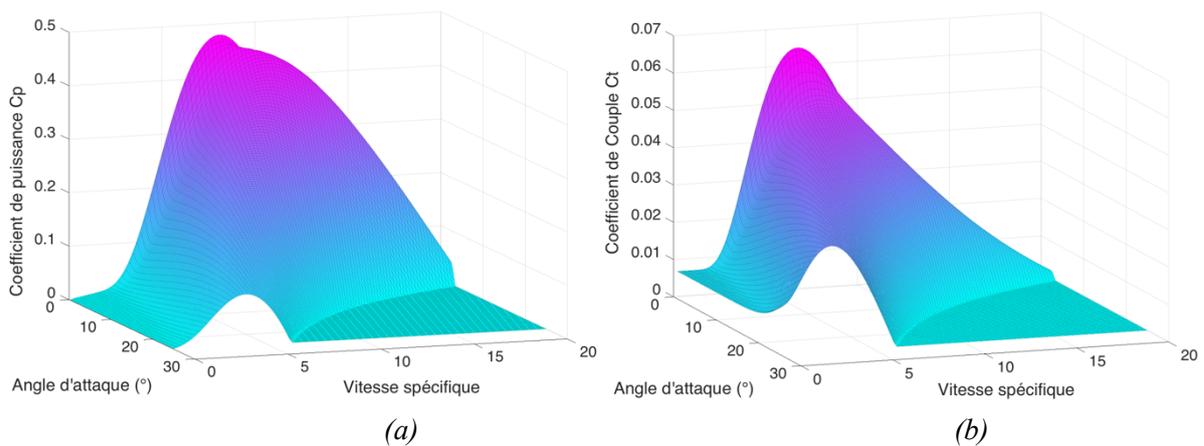


Fig. III. 2. (a) Coefficient de puissance et (b) Coefficient de couple en fonction de la vitesse spécifique et l'angle de calage

A partir de l'expression de la puissance mécanique extraite, on remarque que pour chaque vitesse du vent, il y a une caractéristique de puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, comme le montre la figure III.3 [48, 49].

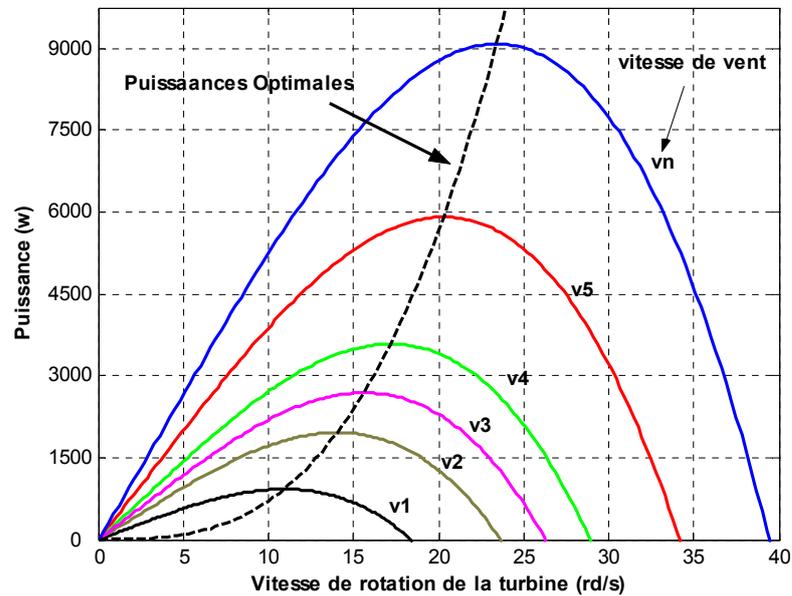


Fig. III. 3. Puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation pour plusieurs vitesses du vent

Au regard de la courbe noire pointillée, qui joint les points de puissances maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser la puissance produite pour chaque vitesse de vent, la turbine devra pouvoir fonctionner à vitesse de rotation variable.

III.4 Modélisation de la chaîne éolienne

La chaîne de conversion éolienne est un système complexe non linéaire à cause de l'interaction de plusieurs domaines, à savoir, aérodynamique, mécanique, et électrique. Un modèle dynamique rassemblant tous les paramètres de l'éolienne est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles désirés [50, 51].

Pour construire un modèle du système éolien, certaines hypothèses doivent être prises en considération afin de simplifier le système à savoir :

- Les pales sont identiques ;
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul système mécanique ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est supposé très faible ;
- L'arbre de transmission est parfaitement rigide.

III.4.1 Modélisation du vent

La vitesse du vent en un point $v_0(t)$ peut-être modélisée par une somme d’une composante moyenne V lentement variable et une composante variable représentant les turbulences $v_t(t)$:

$$v_0(t) = V + v_t(t) \tag{III.10}$$

La composante qui représente la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par l’échelle de longueur L_v et l’écart type σ_v . La construction mathématique de cette composante se fait en deux étapes :

La première étape consiste à construire un spectre de la turbulence à partir d’un bruit blanc filtré. El effet, les filtres les plus utilisés sont le filtre de Von Karman et celui de Kaimal [26]. Dans cette thèse on adopte un filtre de Von Karman qui est définit comme suit [35]:

$$\Phi_v(s) = \frac{K_v(m_1 T_v s + 1)}{(1 + T_v s)(1 + m_2 T_v s)} \tag{III.11}$$

où

$$K_v = \sqrt{2 \cdot T_v \cdot (1 - m_2^2) \cdot \left(\frac{m_1^2}{m_2} - m_2 + 1 - m_1^2\right)^{-1}} \tag{III.12}$$

$T_v = L_v / V$;

K_v : Gain statique du filtre ;

T_v : Constante de temps du filtre ;

L_v : L’échelle de longueur de la turbulence, il dépend de la nature du terrain ;

$m_1 = 0.4$;

$m_2 = 0.25$.

Finalement le model de la vitesse du vent est obtenu à partir d’un bruit blanc Gaussien, et donné par la figure III.4.

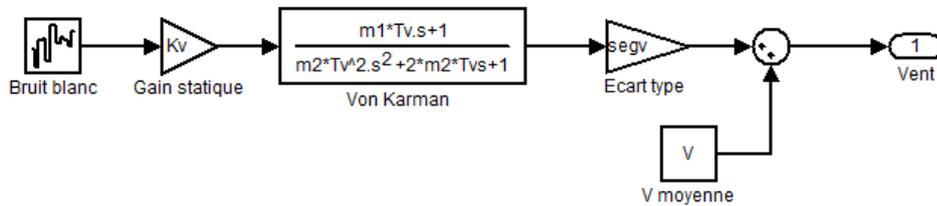


Fig. III. 4. Modèle mathématique de la vitesse du vent

Vu que la turbine joue un rôle de filtre des vitesse du vent, on peut ajouter un filtre mathématique spatial de premier ordre au modèle de la vitesse du vent comme suit :

$$G(s) = \frac{1}{1 + \gamma \frac{R}{V} p} \quad \text{III.13}$$

avec :

R : Rayon de la turbine

γ : Facteur d'affaiblissement sur le rotor ($\gamma = 1.3$)

La figure III.5 montre un profil de vitesse du vent pour deux cas : (a) représente une forte densité de turbulence avec une vitesse moyenne de 8 m/s ; (b) représente une densité moyenne de la turbulence avec une vitesse moyenne de 8 m/s.

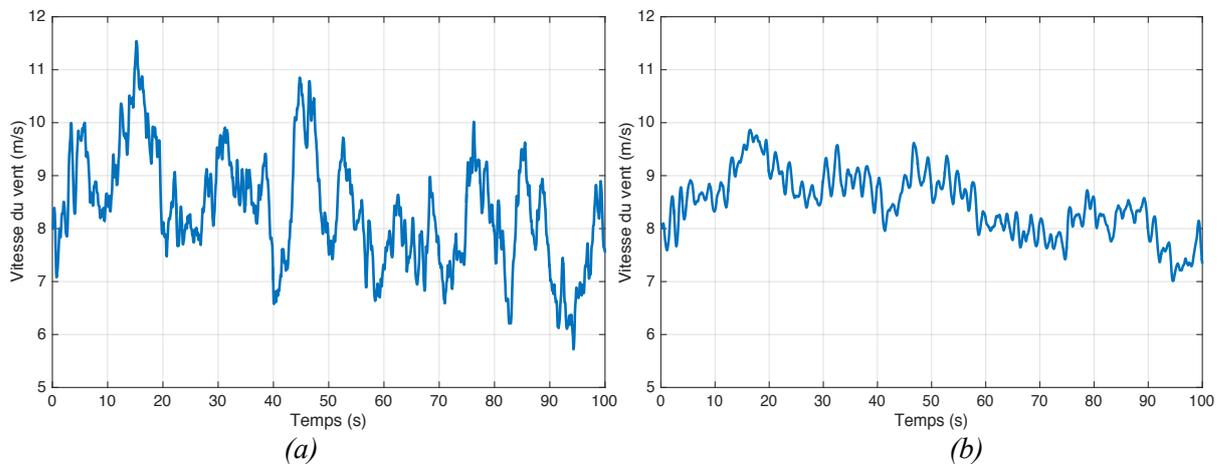


Fig. III. 5. Profil de vitesse du vent: (a) forte turbulence (b) moyenne turbulence

III.4.2 Modèle de la turbine

Les variables d'entrée de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- La vitesse du vent ;
- La vitesse de rotation de la turbine (retour);
- L'angle de calage des pales de la turbine.

A partir de ces trois entrées, on obtient le couple mécanique au niveau de l'arbre de la turbine en utilisant l'expression du couple précédente. Et pour avoir la vitesse de rotation, il y a lieu d'ajouter l'équation mécanique de la turbine [4, 21]:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + f\omega_m \quad \text{III.14}$$

avec :

T_e est le couple désiré, qui est normalement le couple électromagnétique fournie par la GSAP dans le cas de couplage turbine-GSAP ;

J est le moment d'inertie de la turbine-GSAP ;

f est le coefficient de frottements de l'ensemble turbine-GSAP.

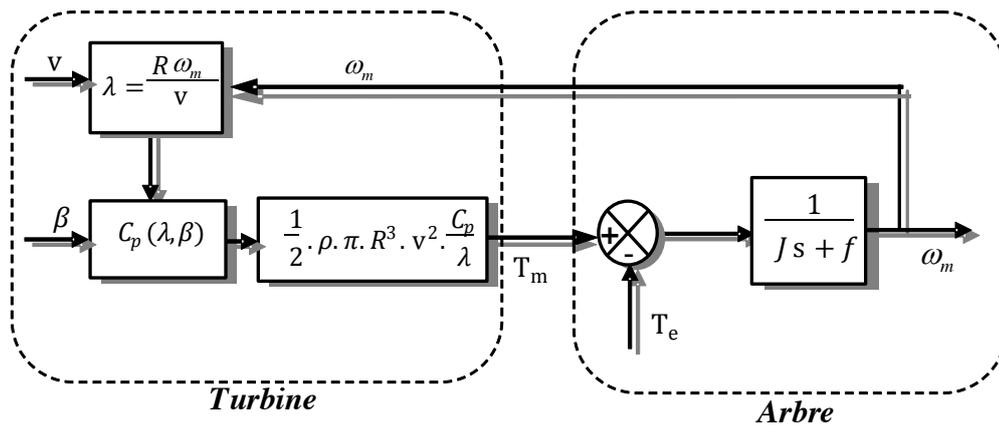


Fig. III. 6. Modèle de la turbine éolienne

III.4.3 Modélisation de la Génératrice Synchrone à Aimants Permanents

La modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce qui permet d'étudier avec pertinence le comportement des différentes variables en mode dynamique et statique, et exploiter ce modèle dans les simulations [20]. Dans la GSAP, le champ magnétique est produit par des aimants permanents. Selon la manière avec laquelle les aimants sont montés sur le rotor ; on peut considérer deux types de GSAP, comme le montre la figure III.8.

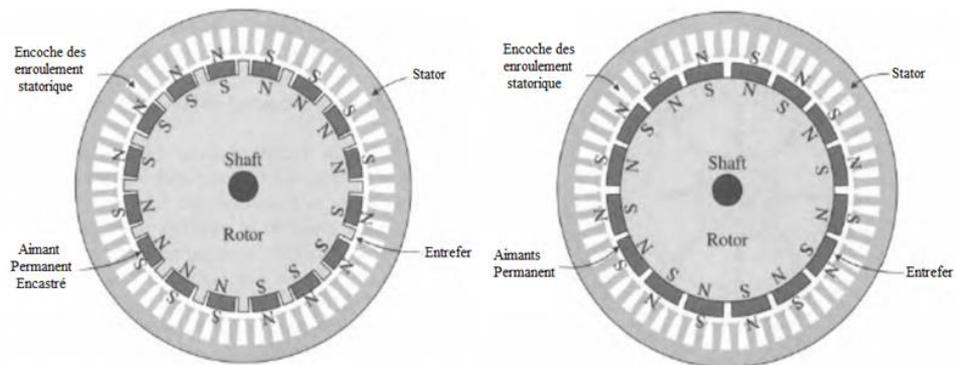


Fig. III. 7. GSAP: (à droite) aimants monts en surface, (à gauche) pôles saillants

a) Machine Synchrone à Aimants Permanents montés en surface

Comme le montre la figure III.7, dans ce modèle les aimants sont placés sur la surface du noyau de rotor, séparées par des matières non ferrite entre deux aimants adjacents. Étant donné que la perméabilité des aimants est très proche de celle des matériaux non ferrite, l'entrefer effectif entre le noyau du rotor et du stator est uniformément répartie autour de la surface du rotor [52, 53]. Ce type de configuration est connu comme une GSAP à pôles non saillants. Son principal avantage est sa simplicité et son faible coût de construction par rapport à la GSAP encastrée. Toutefois, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer le détachement du rotor et, par conséquent, les GSAP montés en surface sont

principalement utilisés dans des applications à faible vitesse. Dans un système de conversion d'énergie éolienne à entraînement direct, la génératrice synchrone est utilisée avec un nombre élevé de pôles.

b) Machine Synchrone à Aimants Permanents à pôles saillants

Dans la GSAP à pôles saillants (figure III.7), les aimants permanents sont incrustés dans la surface du rotor, les forces centrifuges aident à maintenir les aimants attachés au noyau de rotor. Cette configuration permet également de réduire le stress de rotation associés aux forces centrifuges par rapport à la GSAP montés en surface et, par conséquent, ce type de génératrice peut fonctionner à des vitesses de rotation élevées.

III.4.4 Équations de la Génératrice Synchrone à Aimants Permanents

Pour établir les équations mathématiques de la génératrice synchrone à aimants permanents, on néglige la saturation magnétique et les effets thermiques. Du point de vue de commande, on peut la considérer comme une machine à rotor bobiné mais à excitation constante.

a) Équation des tensions :

Le système d'équations de tensions de la génératrice synchrone à aimants permanents est donné par les équations suivantes [20, 54]:

$$\begin{cases} v_a = -R_a \cdot i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ v_b = -R_b \cdot i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ v_c = -R_c \cdot i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{III.15}$$

où $R_a = R_b = R_c = R_s$ sont les résistances statoriques, et ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c respectivement les flux totaux circulant dans les trois enroulements statoriques.

On peut écrire ce système sous forme matricielle comme suit :

$$[v_{abc}] = -R_s \cdot [i_{abc}] + \left[\frac{d\phi_{abc}}{dt} \right] \quad \text{III.16}$$

avec :

$$[v_{abc}] = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad [i_{abc}] = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad [\phi_{abc}] = \begin{pmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{pmatrix}$$

b) Équation des Flux :

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux de l'aimant permanent [54]:

$$[\Phi_{abc}] = \begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} L_a & M_s & M_s \\ M_s & L_b & M_s \\ M_s & M_s & L_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + [\Phi_{sr}] \quad \text{III.17}$$

L_a, L_b, L_c sont les inductances propres des enroulements statoriques ;

M_s est l'inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques

$[\Phi_{sr}]$ est le vecteur flux rotorique projeté sur les trois phases statoriques :

$$[\Phi_{sr}] = \begin{pmatrix} \Phi_{rm} \cdot \cos(\theta) \\ \Phi_{rm} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Phi_{rm} \cdot \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \text{III.18}$$

Où Φ_{rm} est le flux rotorique maximal généré par les aimants permanents

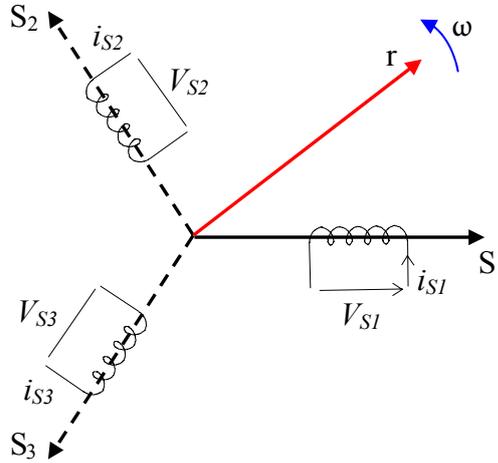


Fig. III. 8. Représentation de la GSAP dans le repère abc

D'autre part, vu que le système est équilibré ($i_a + i_b + i_c = 0$), et les enroulements statoriques sont identiques ($L_s = L_a = L_b = L_c$), on peut écrire le vecteur flux comme suit :

$$[\Phi_{abc}] = \begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Phi_{rm} \cos(\theta) \\ \Phi_{rm} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Phi_{rm} \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \text{III.19}$$

La forme matricielle est donnée comme suit :

$$[\Phi_{abc}] = -(L_s - M_s)[i_{abc}] + [\Phi_{sr}] \quad \text{III.20}$$

c) Équations de la GSAP dans le repère (d,q)

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère (transformation de park). Cette transformation mathématique, transforme les trois

bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$, situées sur le rotor (Figure III.9) [54].

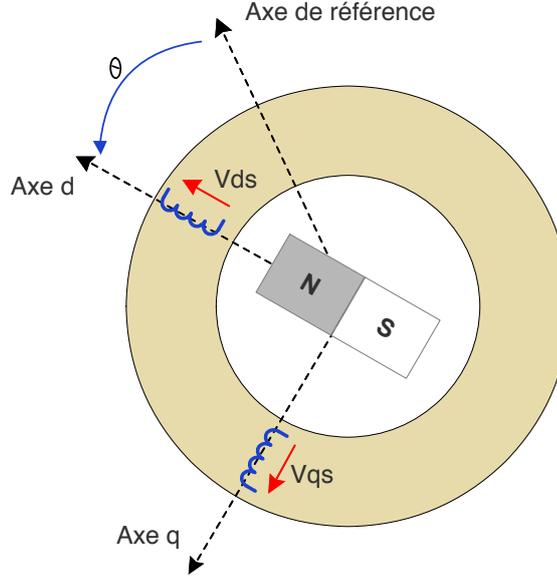


Fig. III. 9. Représentation de la GSAP dans le repère dq

La transformée de Park est donnée par la matrice suivante :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{III.21}$$

Puisque on a aussi besoin de la dérivée de la transformée de Park par rapport au temps, pour ce faire :

$$\frac{dP(\theta)}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{dP(\theta)}{d\theta} = \frac{2}{3} \omega \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{III.22}$$

D'où, la propriété suivante :

$$\frac{dP(\theta)}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} -\phi_q \\ \phi_d \end{bmatrix} \quad \text{III.23}$$

d) Équation des tensions dans le repère (d,q)

Pour simplifier le calcul, on prend un repère d,q lié au champs tournant statorique. Donc, on applique la transformation de Park pour les grandeurs tension, courant et flux, on obtient :

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

L'équation de tensions devient:

$$[v_{dq}] = -R_s P(\theta)[i_{abc}] + P(\theta) \frac{d\phi_{abc}}{dt} \quad \text{III.24}$$

Ce qui implique :

$$[v_{dq}] = -R_s [i_{dq}] + P(\theta) \frac{d(P^{-1}(\theta)\phi_{dq})}{dt} \quad \text{III.25}$$

$$[v_{dq}] = -R_s [i_{dq}] + P(\theta) \frac{dP^{-1}(\theta)}{dt} \phi_{dq} + P(\theta)P^{-1}(\theta) \frac{d\phi_{dq}}{dt} \quad \text{III.26}$$

D'où

$$[v_{dq}] = -R_s [i_{dq}] + \frac{d[\phi_{dq}]}{dt} + \omega \begin{bmatrix} -\phi_q \\ \phi_d \end{bmatrix} \quad \text{III.27}$$

D'autre part :

$$\frac{d[\phi_{dq}]}{dt} = s[\phi_{dq}] \quad \text{avec } s \text{ est l'opérateur de Laplace}$$

Finalement le système d'équation des tensions statoriques est donnée comme suit [52, 55]:

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + s\phi_{ds} - \omega_r \phi_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + s\phi_{qs} + \omega_r \phi_{ds} \end{cases} \quad \text{III.28}$$

e) Équation des Flux dans le repère (d,q)

On applique la transformation de Park au système d'équations du flux, on obtient :

$$[\phi_{dq}] = P(\theta)[\phi_{abc}] = -(L_s - M_s) \cdot P(\theta)[i_{abc}] + P(\theta)[\phi_{sr}] \quad \text{III.29}$$

Ce qui implique

$$[\phi_{dq}] = -(L_s - M_s)[i_{dq}] + \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{III.30}$$

Pour simplifier encore le système d'équation, vu la forte dépendance entre les grandeurs du flux, on suppose que le vecteur flux rotorique coïncide avec l'axe d. Par cette hypothèse, on obtient : $\phi_r = \phi_{dr} + \phi_{qr} = \phi_{dr}$, $\phi_{qr} = 0$, donc le nouveau système d'équation des flux s'écrit :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = -L_d i_{ds} + \phi_r \\ \phi_{qs} = -L_q i_{qs} \end{cases} \quad \text{III.31}$$

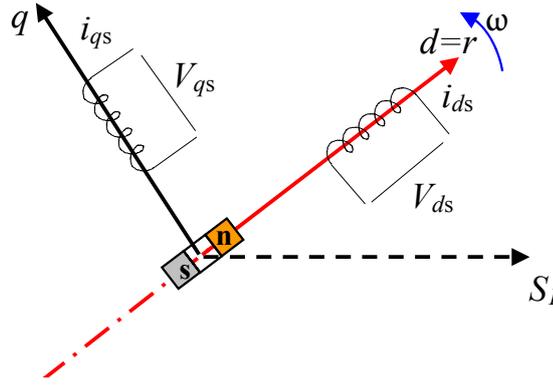


Fig. III. 10. Représentation de la GSAP dans le repère dq avec les hypothèses simplificatrices

En revenant au système d'équations de tensions statoriques, et en remplaçant les expressions du flux statorique, on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} - L_d s i_{ds} + s \Phi_r \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \Phi_r - L_q s i_{qs} \end{cases} \quad \text{III.32}$$

Le terme $s \Phi_r = 0$ car le flux magnétique généré par les aimants permanents est constant. Le système d'équation est réduit à :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} - L_d s i_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \Phi_r - L_q s i_{qs} \end{cases} \quad \text{III.33}$$

L_d et L_q sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ .

A partir de ce système d'équation, on peut schématiser des circuits équivalents de la GSAP dans le repère (d,q), comme le montre la figure III.11

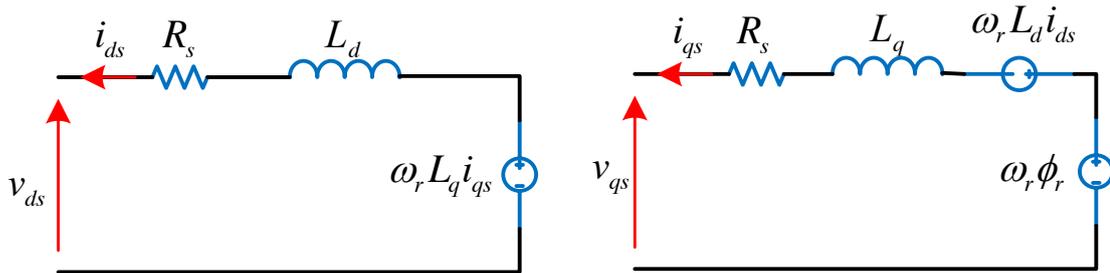


Fig. III. 11. Circuits équivalents de la GSAP

f) Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique de la GSAP est donné par l'expression suivante :

$$T_e = \frac{3p}{2} (i_{qs} \Phi_{ds} - i_{ds} \Phi_{qs}) \quad \text{III.34}$$

Ou par l'expression suivante :

$$T_e = \frac{3p}{2} [i_{qs}\phi_r - (L_d - L_q)i_{ds}i_{qs}] \quad \text{III.35}$$

où p est le nombre de pair de pôles de la GSAP

III.4.5 Modèle de l'ensemble Turbine - GSAP

Vu l'absence du multiplicateur, et en supposant que l'arbre de transmission est parfaitement rigide, la machine synchrone à aimants permanents et la turbine tournent de même vitesse angulaire ω_m [55]. L'équation mécanique de ce système est donnée comme suit :

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + f\omega_m \quad \text{III.36}$$

avec :

J est le moment d'inertie du système turbine – GSAP ;

f est le coefficient de frottements du système turbine – GSAP.

Afin d'examiner le rendement en puissance de notre chaîne éolienne, Nous entraînons notre GSAP via l'éolienne à une vitesse de vent de 12m/s, avec une charge résistive R de 100 Ohm sur la génératrice GSAP via le redresseur à diodes PD3, comme le montre la figure III.12. A l'équilibre naturel, l'éolienne doit produire une puissance de 3800W à ces conditions, de la vitesse de vent et la charge.

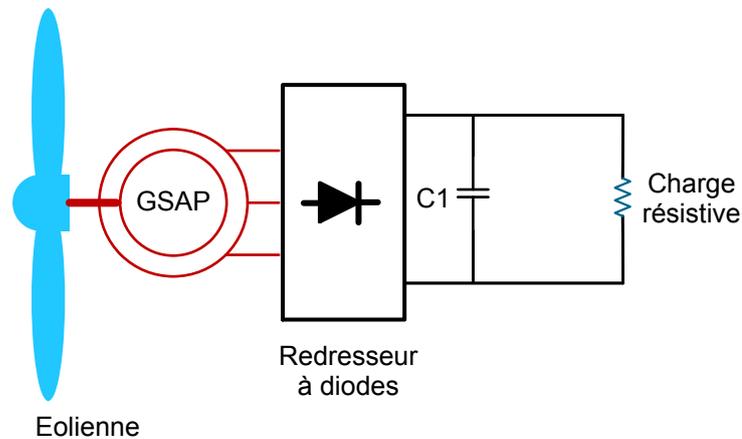


Fig. III. 12. Schéma du système turbine-GSAP

Les résultats de simulations présentés dans les figures III.13 montrent que le coefficient de puissance n'arrive pas à atteindre sa valeur maximale ; par la suite l'éolienne ne produit pas la puissance maximale qui correspond à la vitesse du vent de 12 m/s. La puissance produite est à l'ordre de 45% de la puissance maximale récupérable. Cela est dû au fait que la charge résistive appliquée n'est pas la charge optimale, qui permet de garantir une vitesse de rotation optimale.

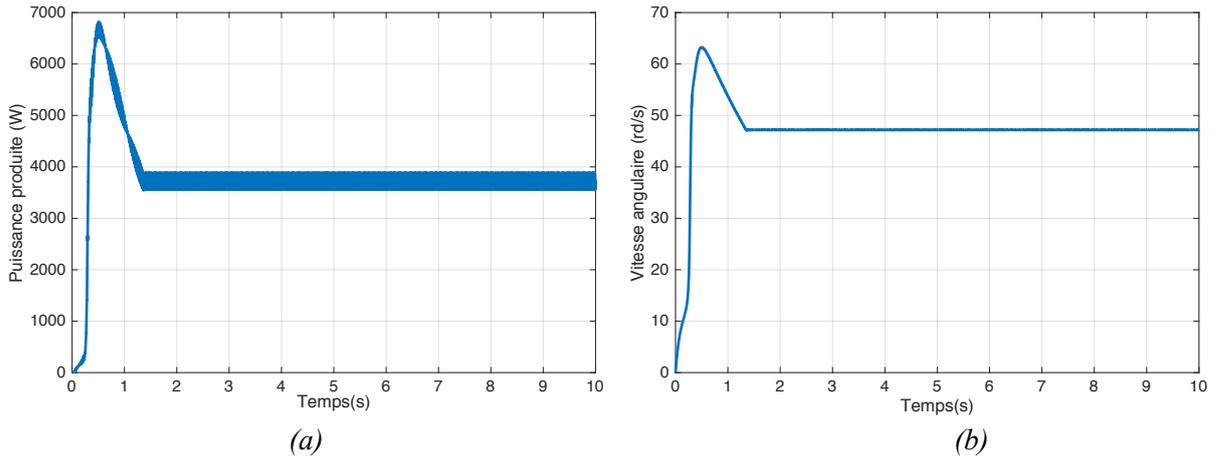


Fig. III. 13. (a) Puissance produite par la GSAP (b) et la Vitesse de rotation de la turbine pour une charge résistive de 100Ω et une vitesse du vent de 12 m/s

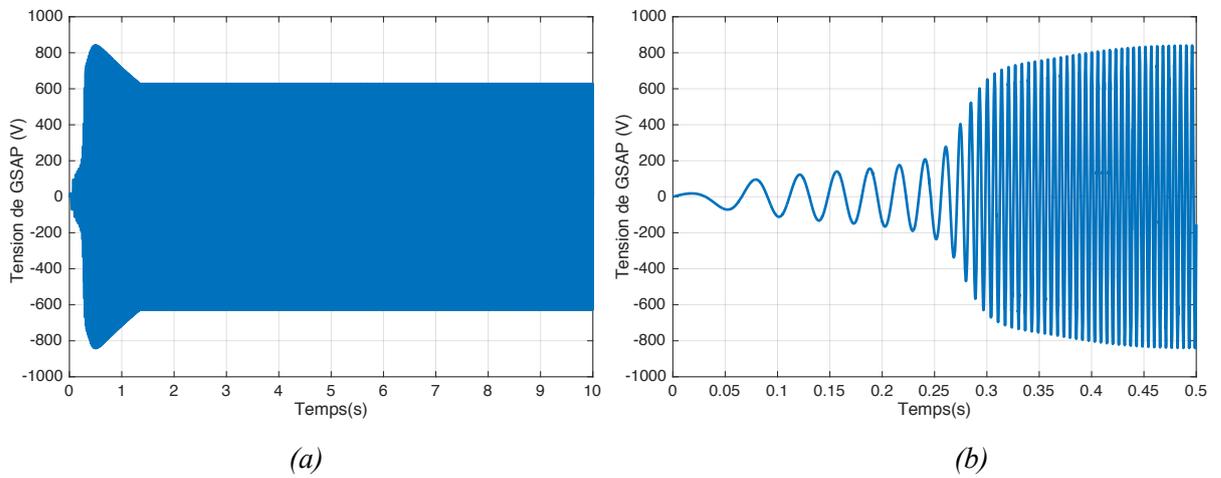


Fig. III. 14. (a) Tension composée de la GSAP (b) avec un zoom au démarrage pour une charge résistive de 100Ω et une vitesse du vent de 12 m/s

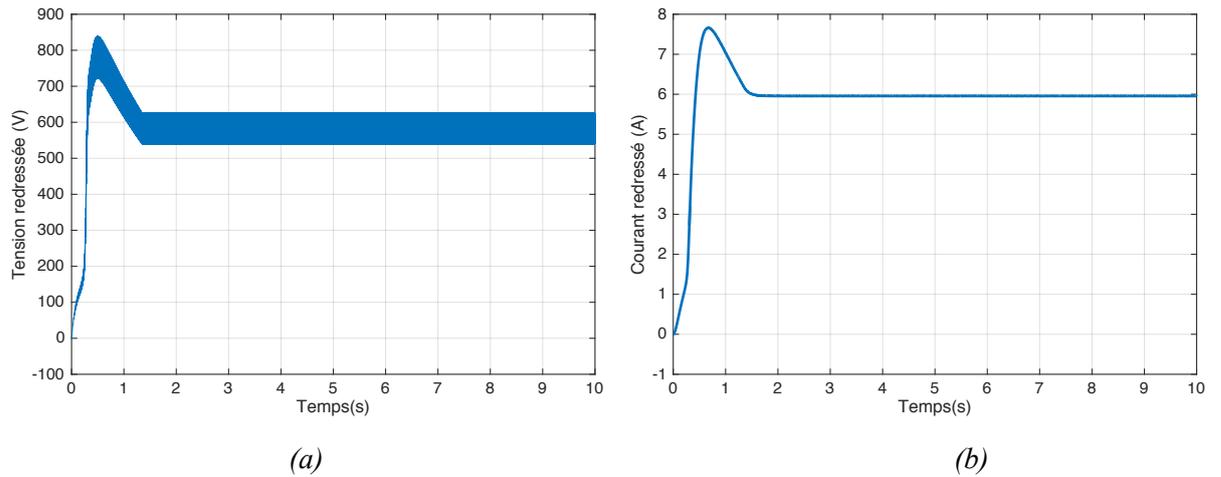


Fig. III. 15. (a) Tension redressée, (b) et Courant redressé par le pont DP3 pour une charge résistive de 100Ω et une vitesse du vent de 12 m/s

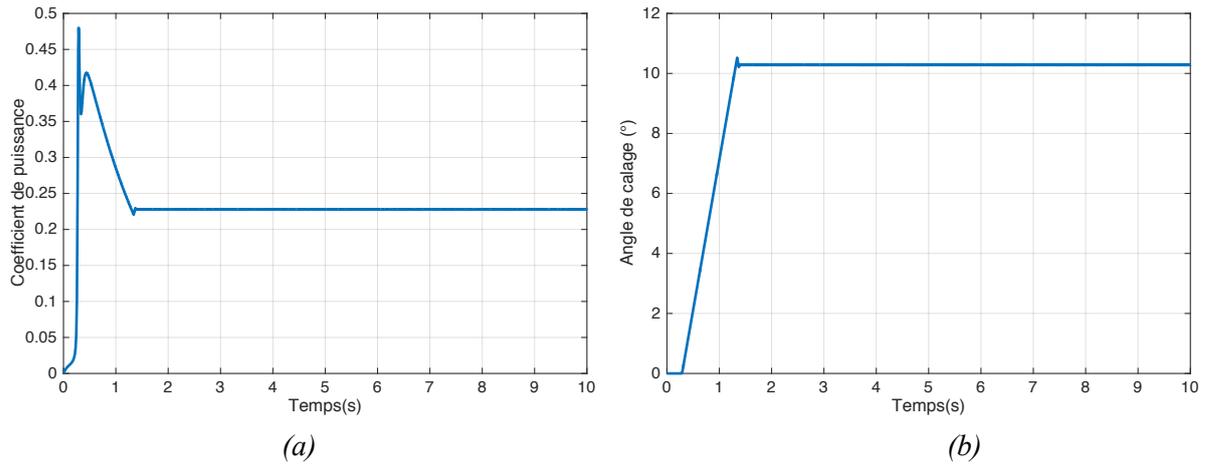


Fig. III. 16. (a) Coefficient de puissance, (b) et l'Angle de calage pour une charge résistive de 100Ω et une vitesse du vent de 12 m/s

III.5 Contrôle de la puissance produite

Il est important de pouvoir à la fois contrôler et limiter la puissance mécanique convertie de manière à tirer le maximum de puissance pendant les vents relativement lents et d'adapter cette puissance à la limite de la puissance nominale tolérée par la génératrice électrique pendant les vents forts.

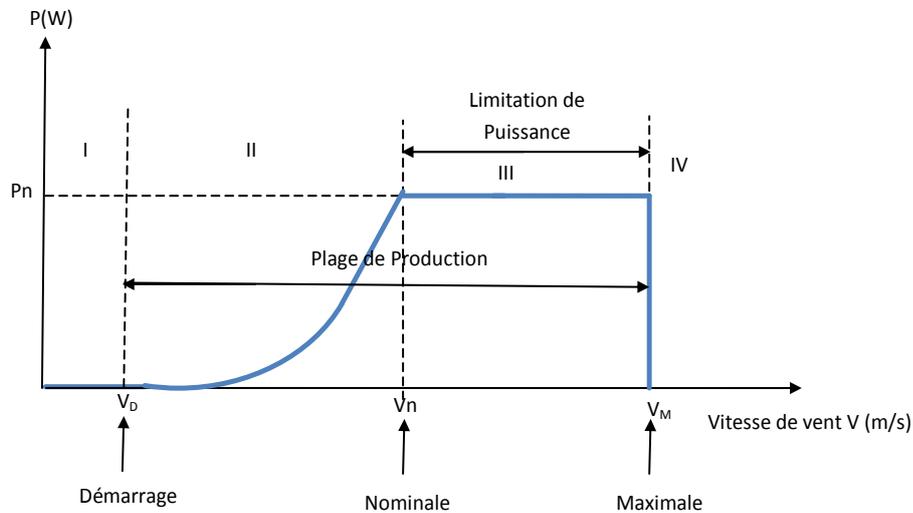


Fig. III. 17. Puissance produite d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent

La courbe de fonctionnement d'une éolienne comporte quatre parties distinctes (Figure III.17) [1, 56]:

1. Une zone à vitesse de vent inférieure à la vitesse d'enclenchement ; dans laquelle la vitesse du vent ne permet pas encore la rotation de l'éolienne et que la puissance qui résultera de sa rotation est inférieure à la consommation et pertes électriques du système éolien en totalité.

2. Une zone où la vitesse de vent est supérieure à la vitesse d'enclenchement et inférieure à la vitesse nominale de l'éolienne. Cette partie de la courbe est caractérisée par une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Le système doit être arrangé de manière à tirer le maximum de profit de cette vitesse de vent et générer le maximum d'énergie électrique possible. Ceci se fait en gardant le coefficient de puissance $C_p = C_{pmax}$. C'est dans cette zone de la courbe que l'on parle des stratégies MPPT (Maximum Power Point Tracking).
3. Une zone de vitesse de vent supérieure à la vitesse nominale et inférieure à la vitesse de déclenchement ; durant laquelle le coefficient C_p doit être contrôlé de manière à limiter la puissance électrique à la puissance nominale de la génératrice électrique utilisée. C'est donc une zone de fonctionnement de l'éolienne avec un rendement réduit.
4. Une zone où la vitesse de vent est supérieure à la vitesse de déclenchement, durant laquelle l'éolienne doit être arrêtée afin d'éviter des dommages du système électrique et celui mécanique

III.5.1 Système d'orientation des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance extraite si la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale du vent, qui correspond généralement à la puissance nominale de la GSAP. En effet, Le régulateur d'angle de calage intervient pour ajuster cet angle afin de protéger la génératrice et les convertisseurs statiques contre les surcharges [57, 58]. L'augmentation de l'angle de calage permet au système de limiter la puissance extraite de la turbine lorsque la vitesse du vent est élevée. Sinon, cet angle de calage est maintenu proche de zéro lorsque la vitesse du vent est inférieure ou égale à la valeur nominale, et ce afin d'augmenter le coefficient de puissance.

Dans la technique illustrée dans la figure III.18, l'erreur $\Delta\beta$ est corrigée par un servomécanisme représenté par un gain K_β .

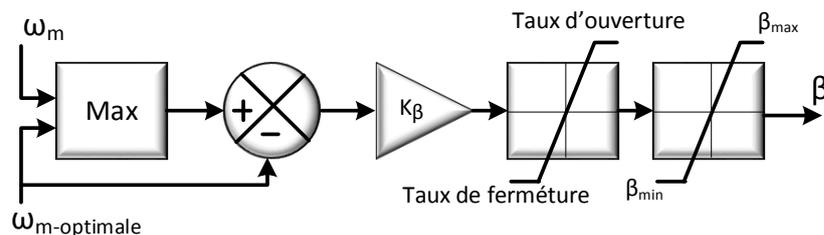


Fig. III. 18. Régulation de l'angle de calage des pales

Lorsque la vitesse de rotation de la turbine dépasse une vitesse $\omega_{m-optimale}$, la commande va donner l'ordre d'augmenter l'angle de calage

$$\beta = K_\beta(\omega_m - \omega_{m-optimale})$$

La figure III. 19 illustre la limitation de la puissance par l'angle de calage.

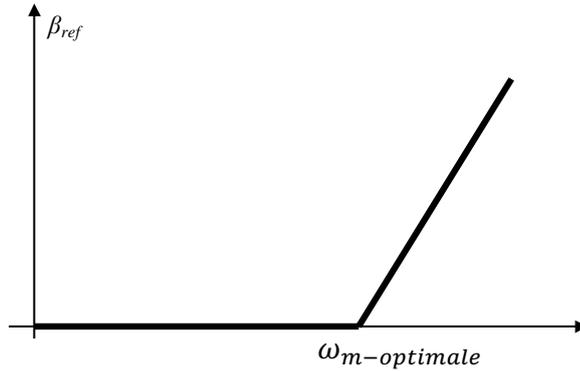


Fig. III. 19. Angle de calage en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

III.5.2 Maximisation de la puissance produite

Dans les moments où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse nominale, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda = \lambda_{opt}$ [2, 53, 59]. Comme l'angle de calage est fixe et égale à zéro, le coefficient de puissance de l'éolienne doit alors rester égal à sa valeur maximale C_{pmax} .

On distingue deux structures de commande MPPT:

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

Plusieurs méthodes de recherche du maximum de puissance sont développées dans la littérature [19, 51, 60-65]. Dans cette thèse, on s'intéresse uniquement à une méthode classique à savoir la méthode Tip Speed Ratio (TSR)

a) Algorithme TSR

La stratégie TSR modifie la vitesse angulaire de l'éolienne pour chaque vitesse du vent, afin de maintenir la vitesse spécifique optimale. Pour notre éolienne, la valeur maximale du coefficient de puissance, qui est de 0,48, est atteint pour une vitesse spécifique optimale de 8,2 et un angle de calage optimal de zéro degré [58]. Par conséquent, la vitesse angulaire optimale est calculée comme suit:

$$\omega_{m-opt} = \frac{v\lambda_{opt}}{R} \quad \text{III.37}$$

En remplaçant à l'expression de la puissance aérodynamique, on obtient :

$$P_{m-max} = \frac{1}{2} \rho A C_{p-max} \left(\frac{R \omega_{m-opt}}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad \text{III.38}$$

La figure III.20 montre les courbes de puissance en fonction de la vitesse angulaire de la turbine avec plusieurs vitesses du vent. Pour meilleures performances, la vitesse spécifique doit être toujours égale à sa valeur optimale λ_{opt} . Par conséquent, la puissance optimale correspondante P_{MPPT} est calculée en fonction de ω_{m-opt} comme suit :

$$P_{MPPT} = K_{opt} \omega_{m-opt}^3 \quad \text{III.39}$$

avec

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3}$$

Pour notre éolienne, $K_{opt} = 0.11$

On peut également tirer l'expression du couple optimal :

$$T_{MPPT} = K_{opt} \omega_{m-opt}^2 \quad \text{III.40}$$

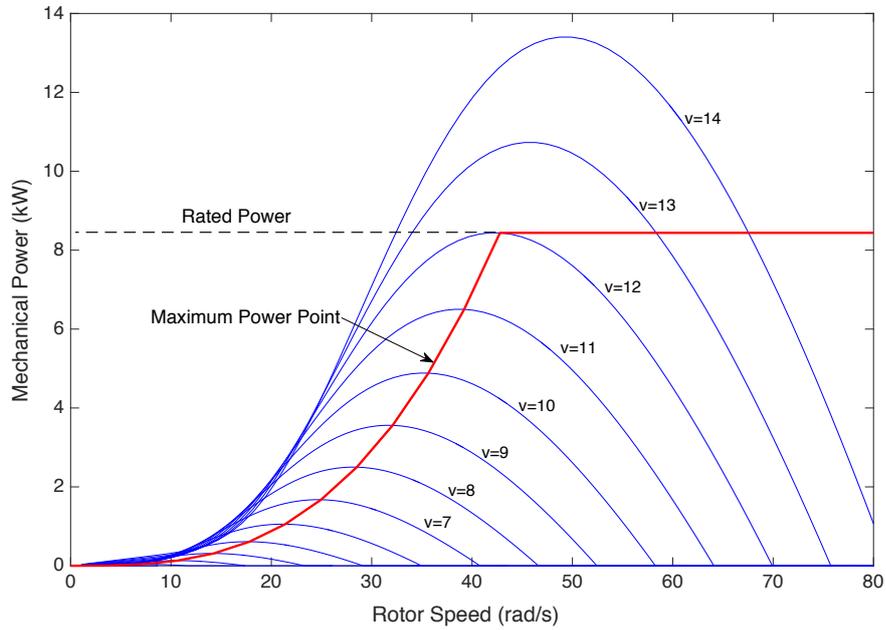


Fig. III. 20. Courbes de puissance en fonction de la vitesse de rotation

La algorithmme TSR, qui donné par la figure III.21, nécessite la mesure instantanée de la vitesse angulaire de l'éolienne, afin de calculer la puissance de référence [53].

$$P_{ref} = K_{opt} \omega_m^3 \quad \text{III.41}$$

Puis, cette puissance est utilisée pour calculer le courant de référence comme suit :

$$I_{rec-ref} = \frac{P_{ref}}{V_{rec}} \tag{III.42}$$

L'erreur entre le courant de référence et le courant mesuré permet d'ajuster sur le rapport cyclique de hacheur survolteur pour forcer la turbine à générer la puissance maximale.

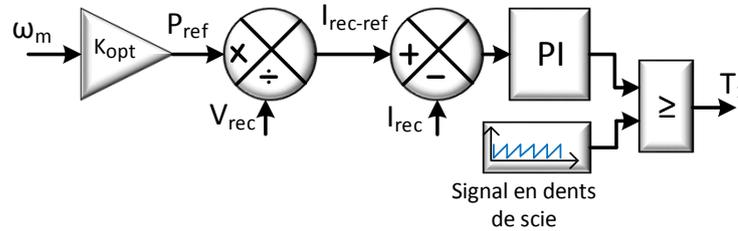


Fig. III. 21. Algorithmme TSR utilisée pour l'optimisation de la puissance

Afin de tester les performances de l’algorithme de poursuite de la puissance maximale (TSR) et la limitation de puissance en cas de dépassement de la vitesse du vent, nous avons modélisé la petite éolienne autant que système chargeur de batterie [48, 49, 66], comme le montre la figure III.22. Une batterie a été connectée à la GSAP via un hacheur boost.

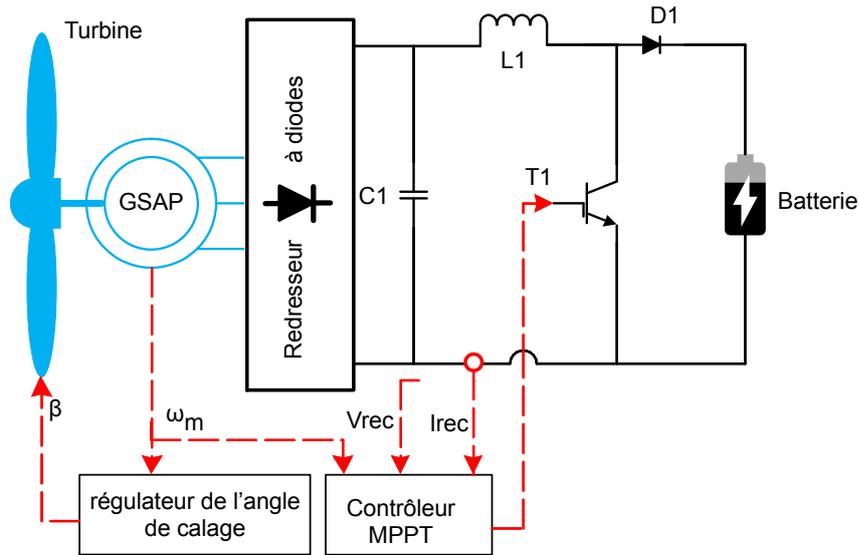


Fig. III. 22. Circuit de commande de MPPT et de l'angle de calage

III.6 Résultats de simulation

Le modèle de l'éolienne ainsi que toutes les structures de commande sont testés sous Matlab/Simulink. Les résultats de simulation présentés correspondent à une turbine de 8.5 kW dont les paramètres sont donnés en annexe.

III.6.1 Résultats pour l'optimisation de la puissance

Dans cette partie de simulation, nous avons appliqué un profil de vitesse du vent à des vitesses du vent inférieures à 12 m/s (voir la figure III.23) afin d'examiner le méthode de MPPT adoptée (TSR). Les résultats de simulation ont bien montré la performance de cette méthode.

En effet, le coefficient de puissance est toujours gardé à sa valeur maximal par le changement de la vitesse de rotation de la turbine, et ce pour rapprocher à la valeur optimale de la vitesse spécifique (environ 8.2).

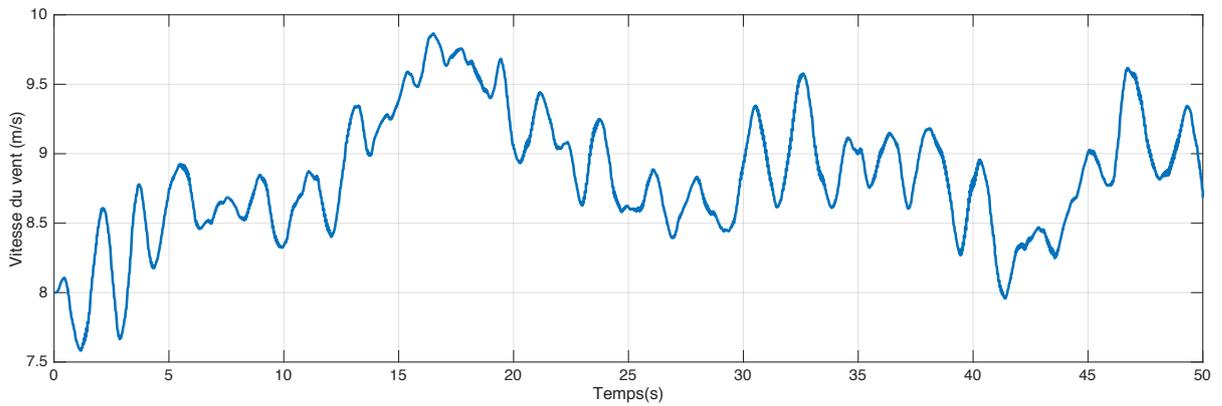


Fig. III. 23. Profil de la vitesse du vent appliqué

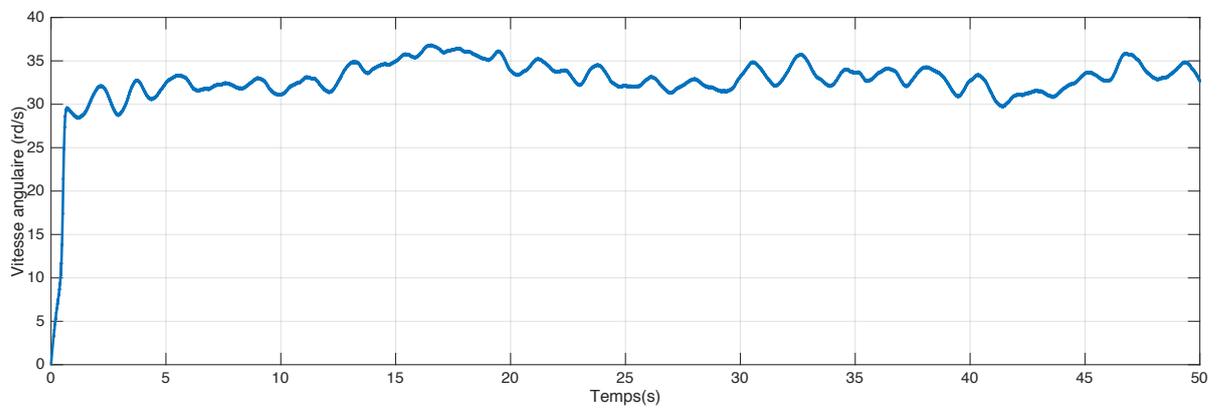


Fig. III. 24. Vitesse de rotation de la turbine-GSAP

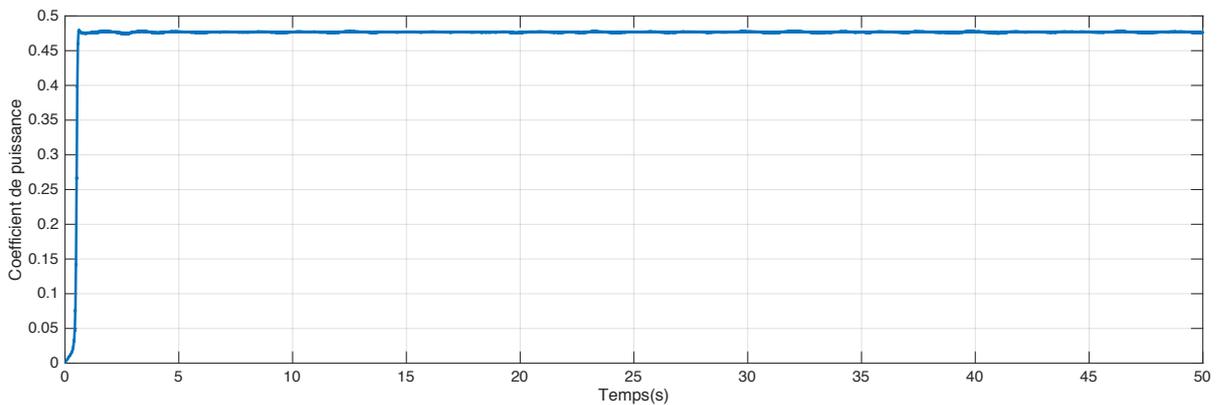


Fig. III. 25. Coefficient de puissance de la turbine

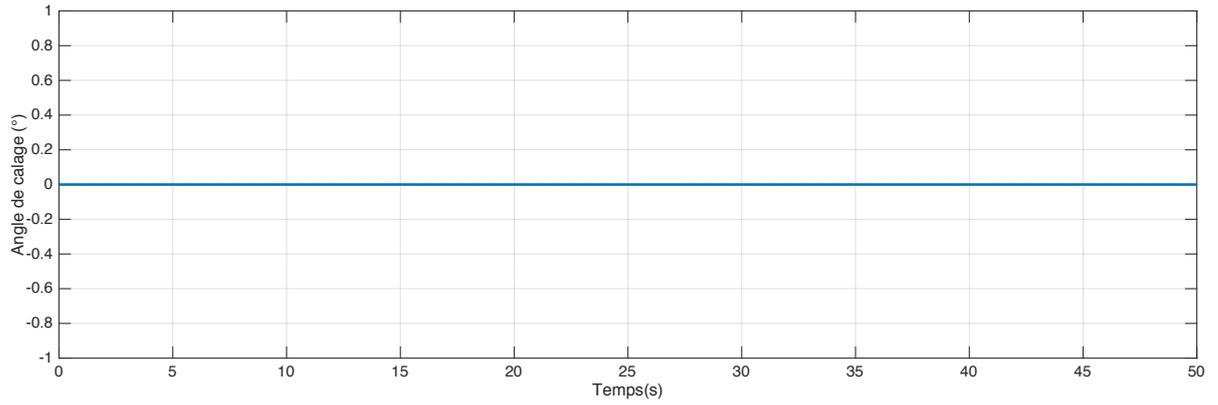


Fig. III. 26. Angle de calage des pales de la turbine

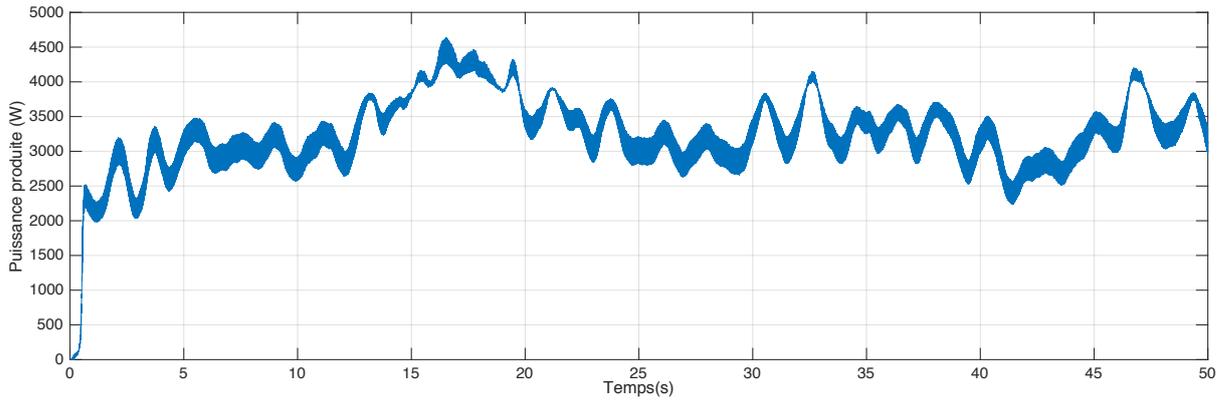


Fig. III. 27. Puissance active produite par la GSAP

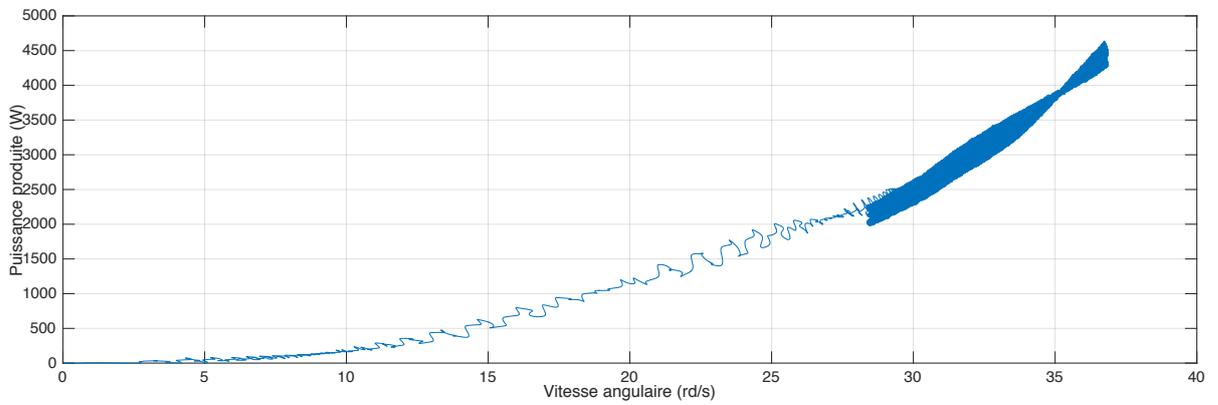
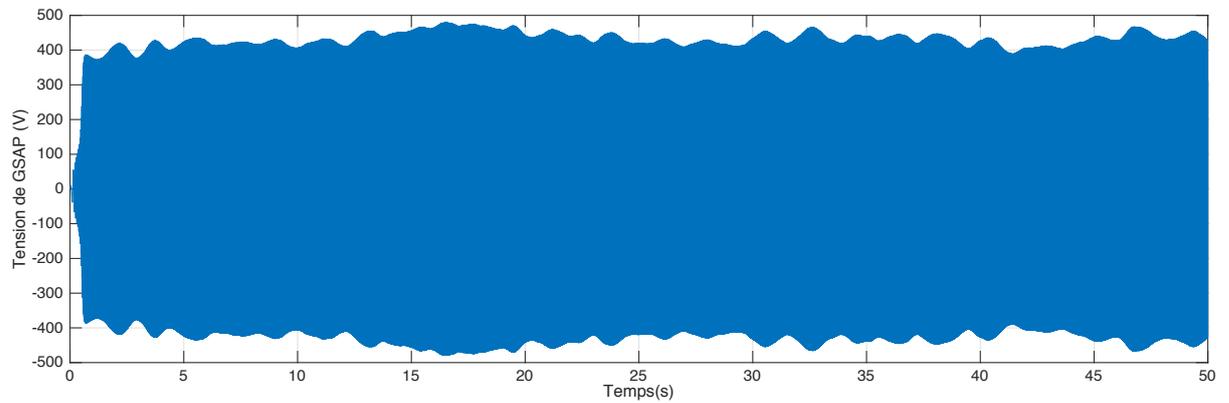
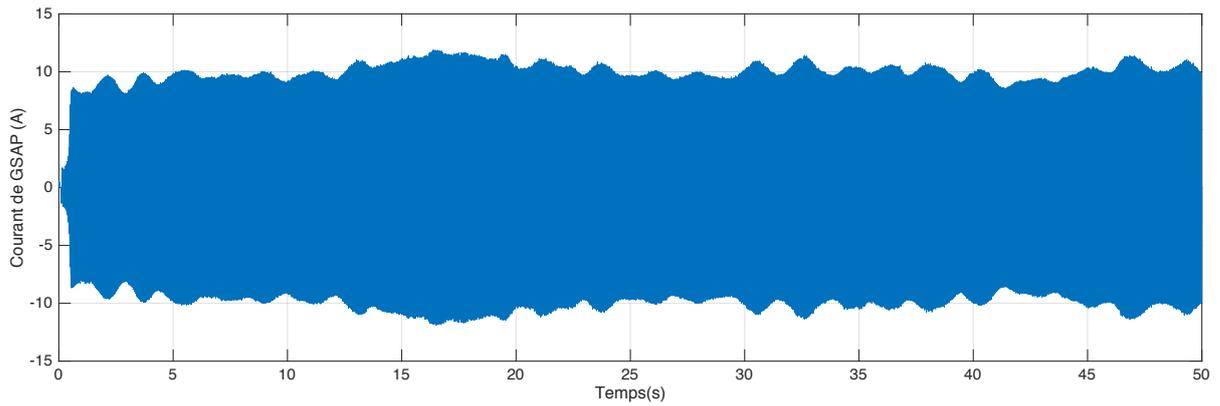


Fig. III. 28. Puissance active produite par la GSAP en fonction de la vitesse de rotation

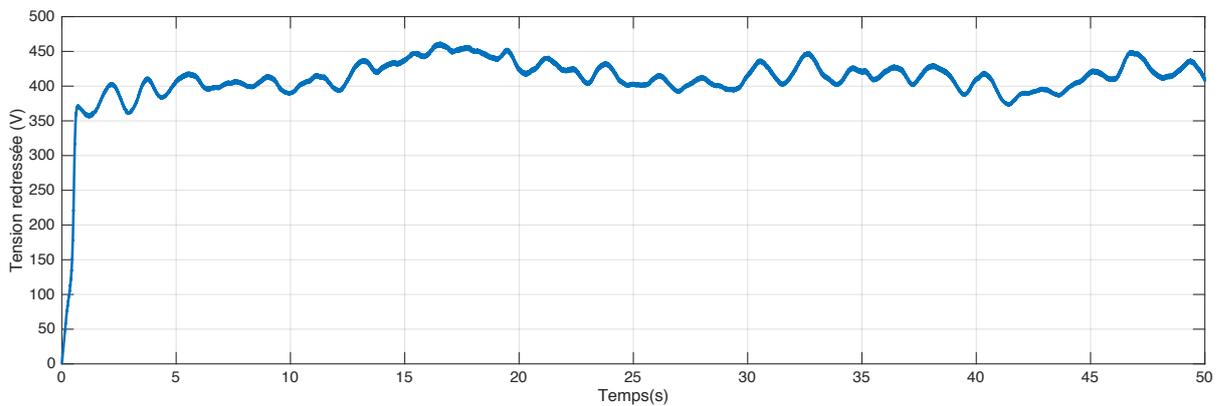


(a)

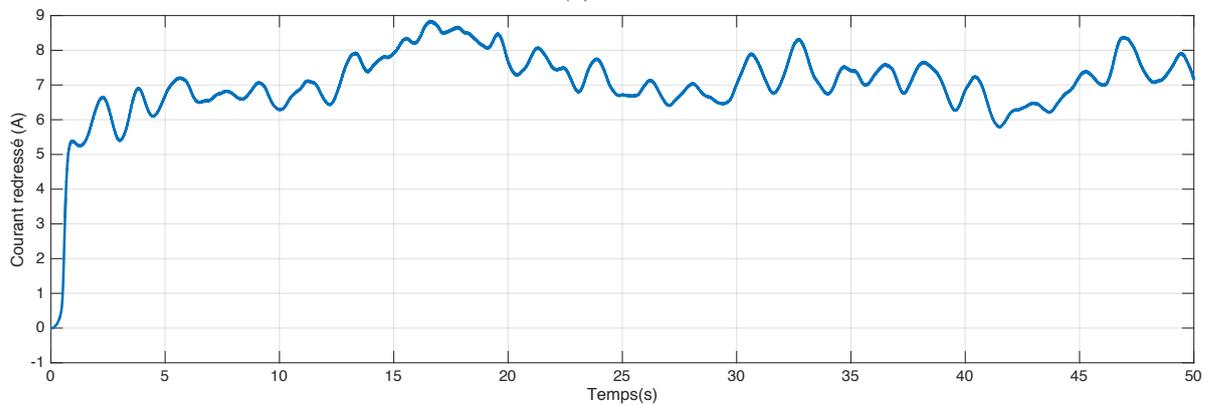


(b)

Fig. III. 29. (a) Tension et (b) Courant de la GSAP



(a)



(b)

Fig. III. 30. (a) Tension et (b) Courant après redressement

III.6.2 Résultats pour la limitation de puissance

Pour examiner le système d'orientation des pales, nous avons appliqué un profil de vitesse du vent à des vitesses du vent supérieures à 12 m/s (voir la figure III.31). Les résultats de simulation ont bien montré la performance du régulateur proportionnel utilisé. En effet, le coefficient de puissance est toujours gardé inférieur à sa valeur maximal via le changement de l'angle de calage des pales.

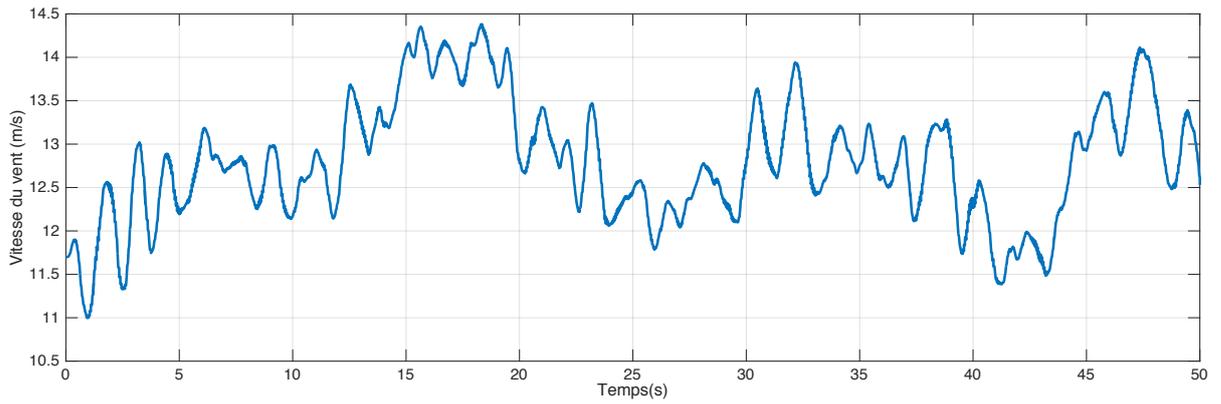


Fig. III. 31. Profil de vitesse du vent appliqué

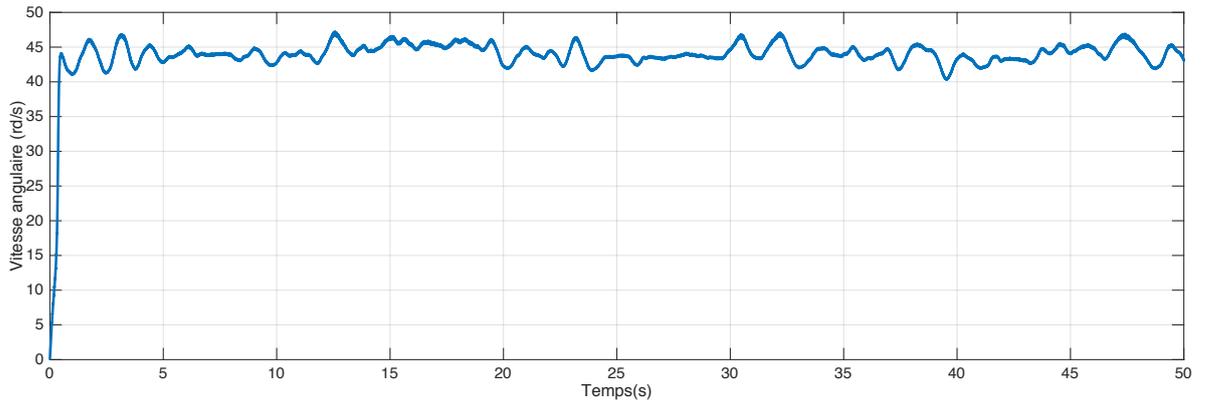


Fig. III. 32. Vitesse de rotation de la turbine - GSAP

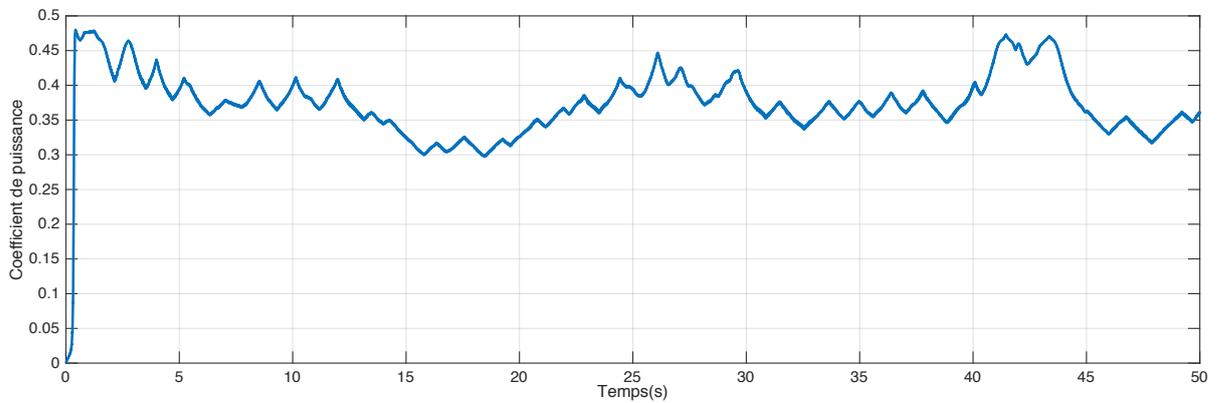


Fig. III. 33. Coefficient de puissance de la turbine

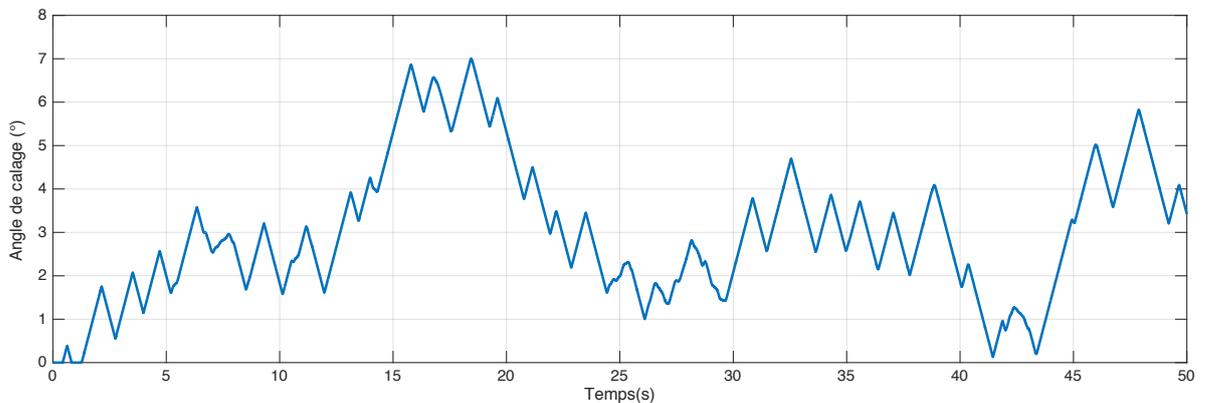


Fig. III. 34. Angle de calage des pales de la turbine

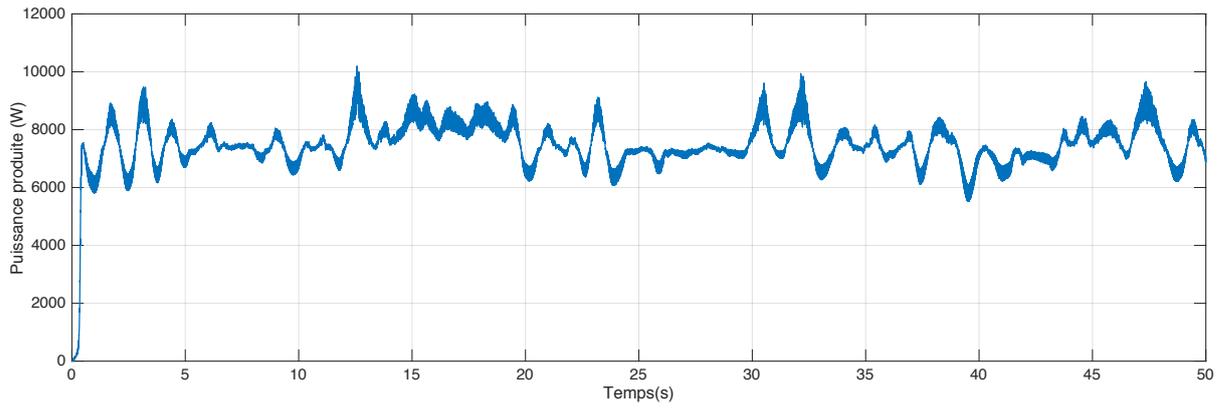


Fig. III. 35. Puissance active produite par la GSAP

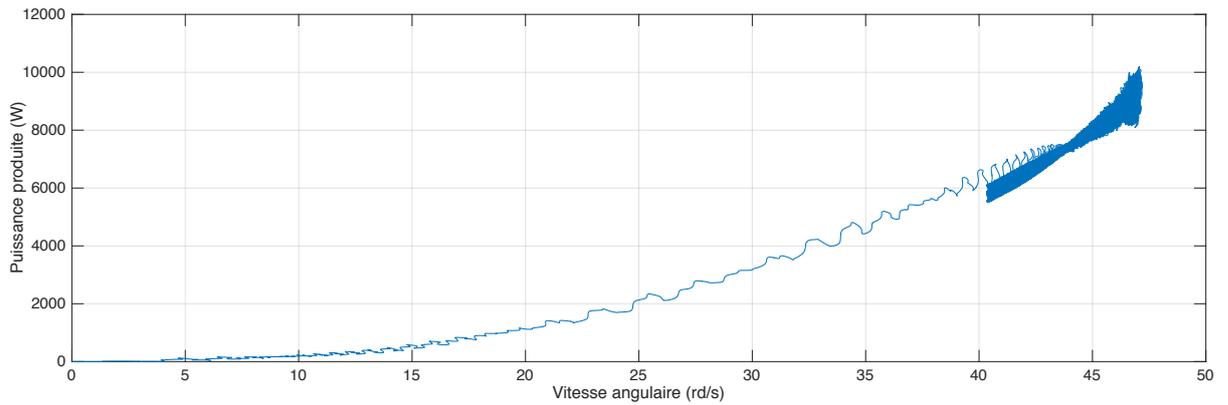
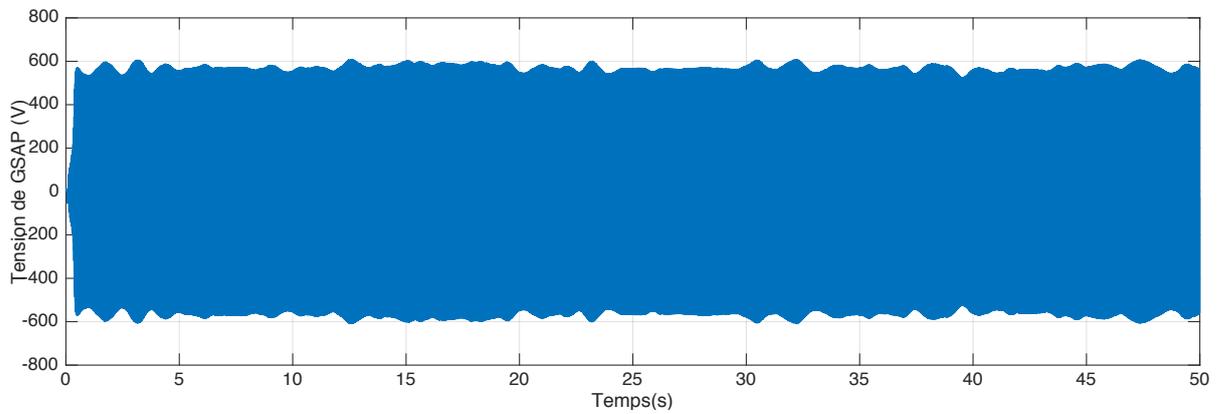
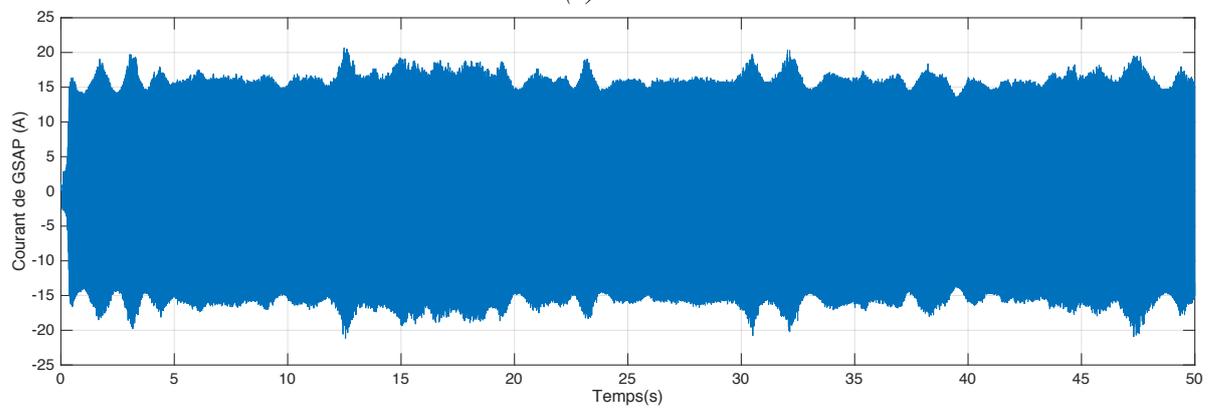


Fig. III. 36. Puissance active produite par la GSAP en fonction de la vitesse de rotation



(a)



(b)

Fig. III. 37. (a) Tension et (b) Courant de la GSAP

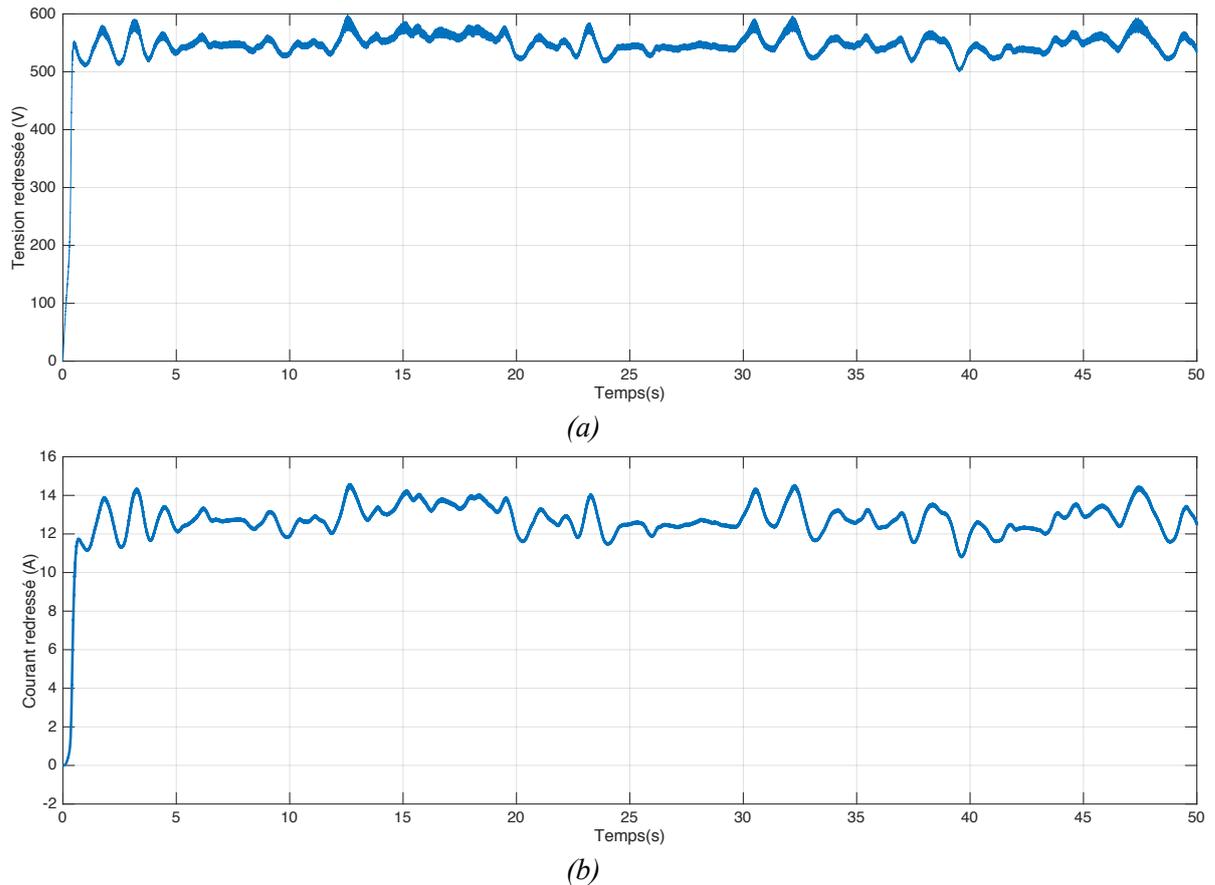


Fig. III. 38. (a) Tension et (b) Courant de la GSAP après redressement

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite puissance basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. La maximisation de la puissance produite a été réalisée par l'utilisation de l'algorithme TSR (Tip speed ratio), et puis implantée sur un hacheur boost pour varier la vitesse de rotation de la turbine. Un régulateur proportionnel a été utilisé pour limiter la puissance produite à sa valeur nominale en cas de vitesses du vent élevées. A la fin du chapitre, la chaîne de conversion éolienne a été modélisée et simulée sous environnement Matlab/Simulink.

Conception d'un générateur de soudage à base d'une petite éolienne à GSAP

IV

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un générateur de soudage à l'arc basé sur une petite éolienne à génératrice synchrone à aimants permanents de 8.5 kW, afin de l'utiliser comme une alternative du groupe diesel de soudage, déjà employé dans les sites isolés et/ou les endroits sans réseau de distribution. L'éolienne utilisée est de type industrielle ou domestique avec turbine couplée directement à la génératrice GSAP sans multiplicateur afin d'optimiser le système [48, 49, 67]. Cette éolienne permet aussi de fonctionner en vitesse de rotation variable en implémentant l'une des méthode de maximisation de la puissance éolienne. L'avantage de cette option est que, dans les régions moins ventées, l'éolienne sera très rentable, grâce au nombre d'heures de fonctionnement élevé [68, 69]. D'autre part, vu que l'énergie éolienne n'est pas garantie aux moments de besoin, nous avons prévu un système de stockage d'énergie constitue de batteries en Plomb-Acide. Par ailleurs, Le générateur de soudage proposé est basé sur un onduleur en pont complet (Full-Bridge), en raison de sa capacité de contrôler un fort courant de soudage avec des commandes numériques avancées [8, 14, 70]. Tout le système proposé est modélisé et simulé.

IV.2 Description du générateur de soudage proposé

Le schéma global du générateur de soudage à l'arc à base d'une éolienne proposé dans cette thèse est illustré par la figure IV.1 [23] ; il est composé essentiellement de :

1. une petite éolienne à vitesse variable de 8,5 kW basée sur une GSAP à plusieurs pôles ;
2. un redresseur triphasé à diodes ;
3. un hacheur survolteur mené d'un régulateur MPPT ;
4. un banc de batteries de stockage
5. un régulateur pour charger/décharger les batteries ;
6. un système de dissipation d'énergie pour dissiper l'excès de puissance ;
7. un onduleur en pont complet ;
8. un transformateur à haute fréquence à point milieu ;
9. un redresseur à diodes rapides ;
10. une inductance de filtrage pour lisser le courant de soudage.

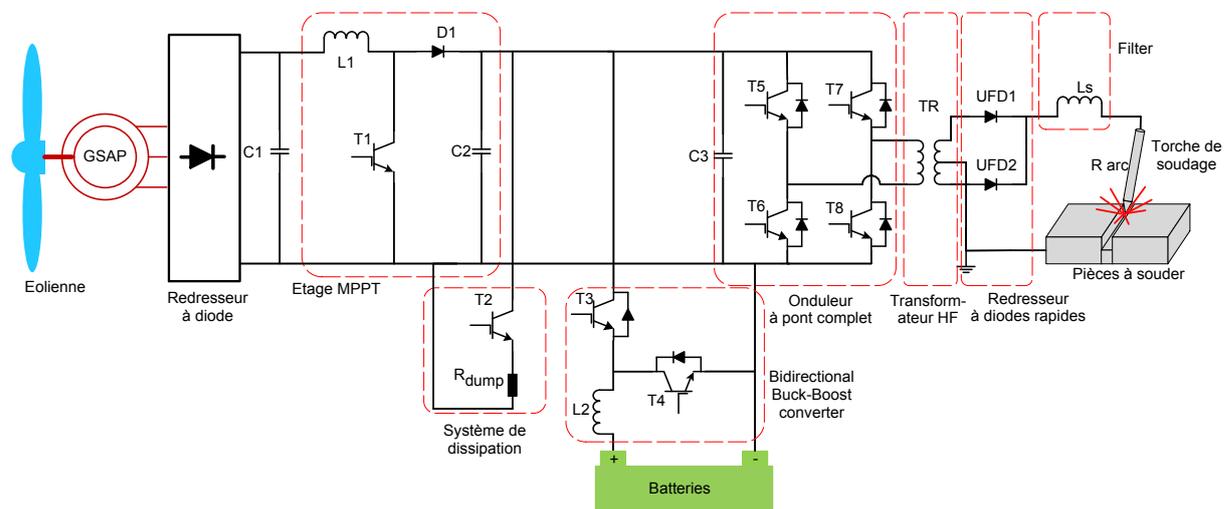


Fig. IV. 1. Schéma global du générateur de soudage basé sur une éolienne à GSAP

IV.3 Éolienne à GSAP

C'est une petite éolienne de 8.5 kW de type domestique ou industrielle, basés sur une GSAP afin d'améliorer les performances, et munie d'un système d'orientation des pales pour extraire le maximum de puissance du vent. La vitesse nominale du vent de cette éolienne est choisie entre 10 et 12 m/s ; une vitesse basse permet de fonctionner aux sites à faible vitesse du vent, et d'augmenter la durée annuelle de production. L'étude et la modélisation de la chaîne de conversion éolienne avec une génératrice GSAP sont présentées au chapitre III.

IV.3.1 Stratégie de MPPT

La stratégie de maximisation de puissance éolienne utilisée dans notre système de soudage est celle détaillée en paragraphe III.5.2. Elle donne une relation linéaire entre la puissance maximale et la vitesse de rotation optimale comme suit :

$$P_{MPPT} = K_{opt} \omega_{m-opt}^3$$

IV.1

avec

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3}$$

IV.3.2 Stratégie de limitation de puissance

Dans le générateur de soudage proposé, la technique de limitation de la puissance produite lorsque la vitesse du vent dépassé la valeur nominale de l'éolienne est celle représentée et détaillée au paragraphe III.5.1.

IV.4 Onduleur de soudage

Le procédé de soudage nécessite un courant constant élevé, plus 100 A, avec une tension en circuit ouvert très basse à l'ordre de 70 V [10]. Pour ce faire, un onduleur de soudage de type pont complet (Full-Bridge) est utilisé. Il comprend les composants suivants, comme le montre la Figure IV.2 [7, 8, 71] :

- Deux bras, chacun comporte deux transistors IGBT avec diode en tête-bêche ;
- Un transformateur à haute fréquence à point-milieu, afin d'avoir une isolation galvanique et une tension basse ; il permet aussi de doubler la fréquence d'ondulation du courant de soudage, ce qui permet de réduire la taille de l'inductance de filtrage L_s ;
- Un redresseur à diodes rapides (UFD1 et UFD2) ;
- Une bobine de lissage de courant L_s est nécessaire.

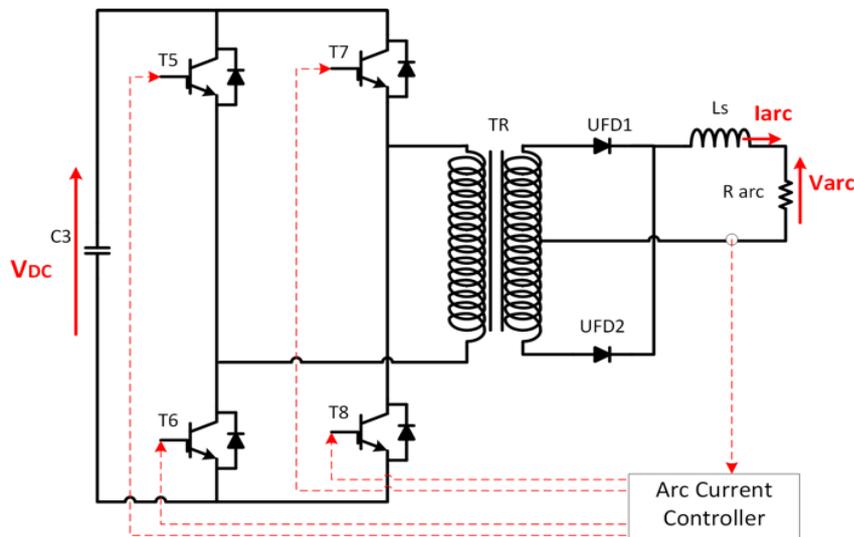


Fig. IV. 2. Topologie d'onduleur adoptée pour le générateur de soudage proposé

Pour avoir un courant de soudage plus stable, le régulateur du courant doit agir sur la durée de conduction de l'IGBT à travers la technique de modulation de largeur d'impulsion

(MLI). Un cycle de commutation donc comprend quatre phases, comme illustré dans la figure IV.3, et peut être décrit comme suit [12, 22]:

$$\begin{cases} V_{arc} = mV_{DC} = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + R_{arc}i_{arc} & [T_6, T_7 \text{ fermés}] \\ V_{arc} = 0 = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + R_{arc}i_{arc} & [T_6, T_7 \text{ ouverts}] \\ V_{arc} = mV_{DC} = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + R_{arc}i_{arc} & [T_5, T_8 \text{ fermés}] \\ V_{arc} = 0 = L_s \frac{di_{arc}}{dt} + R_{arc}i_{arc} & [T_5, T_8 \text{ ouverts}] \end{cases} \quad \text{IV.2}$$

avec :

V_{arc} est la tension de l'arc;

R_{arc} est la résistance de l'arc

i_{arc} est le courant de l'arc

m est le rapport de transformation

α est le rapport cyclique, qui est donné comme suit :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} \quad \text{IV.3}$$

avec

t_{on} est la durée de conduction des IGBTs ;

T est la période de commutation.

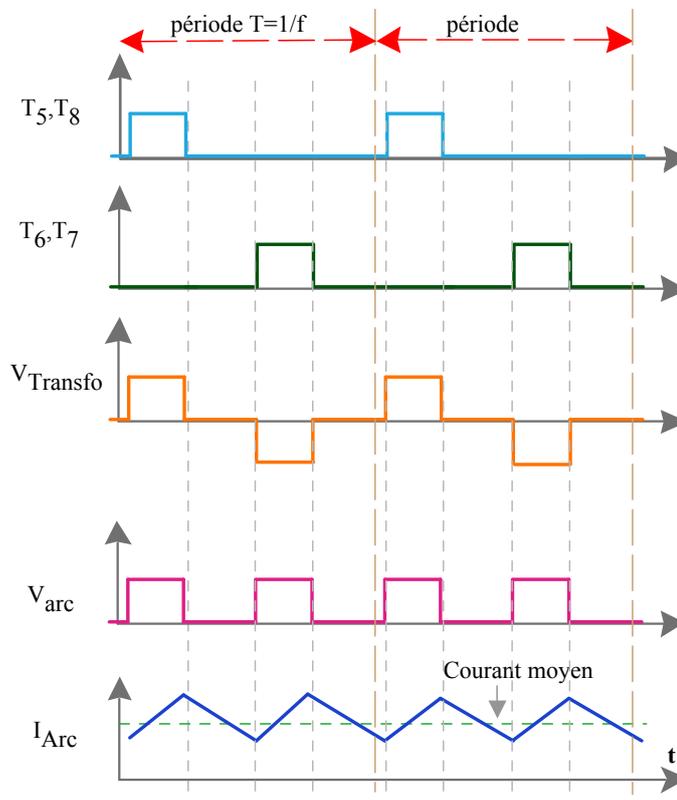


Fig. IV. 3. Formes d'onde du courant et tension d'arc

Il est à noter que le rapport cyclique α ne doit jamais dépasser 0.5 (50%) afin d'éviter des éventuels courts-circuits de la source, principalement dû à la commutation des IGBTs.

IV.4.1 Régulation du courant de l'arc :

Vu la fluctuation de la longueur de l'arc, il nécessaire de tenir en compte une perturbation sur la résistance de l'arc durant la procédure de soudage afin d'éviter toute erreur. Cette perturbation est généralement due aux fluctuation dans la distance entre la torche de soudage (l'électrode) et les pièces à souder. Pour cela un paramètre de soustraction ΔR_{arc} est à ajouter au système de régulation. La figure IV.4 présente un système de régulation du courant de l'arc basé sur un régulateur conventionnel de type PI, tout en tenant en compte les perturbations pour avoir un courant plus stable à la sortie.

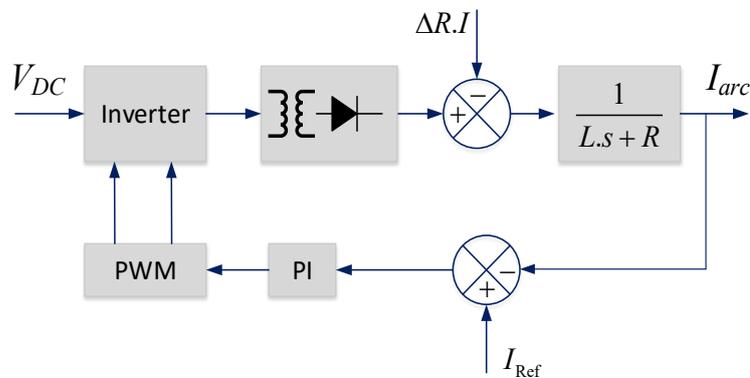


Fig. IV. 4. Diagramme de la régulation du courant de soudage

IV.5 Batterie de stockage:

Du fait que le système de soudage proposé fonctionne de manière autonome, sans aucun besoin de réseau électrique de distribution, les batteries constituent un élément essentiel car la puissance générée par l'éolienne est généralement fluctuante [23]. La batterie emmagasine l'excès d'énergie produite par l'éolienne ; puis elle participe à alimenter la charge de l'arc dans le cas d'absence ou d'insuffisance de la puissance éolienne. Le choix de la technologie des batteries à employer est généralement porté sur les batteries au plomb. Cette technologie est caractérisée par l'avantage d'être moins coûteuse par rapport aux autres technologies

IV.5.1 Modélisation de Batteries de stockage:

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Les différents modèles existant dans la littérature pour la technologie plomb-acide sont d'une mise en œuvre difficile notamment à cause du nombre élevé de paramètres à déterminer [72]. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, beaucoup de scientifiques utilisent le modèle développé par le CIEMAT (Centre de recherche en énergie, environnement et la technologie en Espagne) [73]. Le circuit équivalent de la batterie de stockage est représenté par la figure IV.5, et composé par une f.é.m. en série avec une résistance interne.

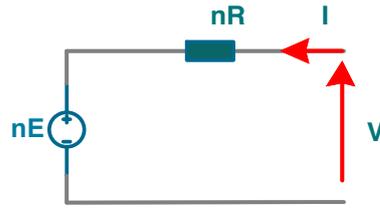


Fig. IV. 5. Schéma équivalent de la batterie

À partir de ce schéma, nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$V = nE \pm nRI \quad \text{IV.4}$$

avec :

E est la force électromotrice de l'accumulateur ;

R est la résistance interne de l'accumulateur ;

n nombre des accumulateurs dans la batterie ;

V et I sont respectivement, la tension et le courant de la batterie

a) Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge \bar{I} , du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement C_{10} , dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C [73].

$$C = C_{10} \frac{1.67}{1 + 0.67 \left(\frac{\bar{I}}{I_{10}} \right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad \text{IV.5}$$

avec :

C_{10} est la capacité de décharge en 10 heures;

I_{10} est le courant de décharge en 10 heures;

ΔT est l'échauffement de la batterie.

La capacité C sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie (EDC). Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie Q .

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C} \quad \text{IV.6}$$

L'évolution temporelle de Q dépend du mode de fonctionnement de la batterie.

b) Équation de la tension en décharge

L'expression de la tension de batterie est établie à partir des deux équations précédentes, qui nous permet de donner une structure liée des éléments internes de la batterie en fonction de la force électromotrice, de la résistance interne et de l'influence des paramètres.

$$V_d = n(2.085 - 0.12(1 - EDC)) - n \frac{|I|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I|^{1.3}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad \text{IV.7}$$

c) Équation de la tension en charge

L'équation de charge présente la même structure que l'équation de décharge qui fait apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne.

$$V_c = n(2 + 0.16 \cdot EDC) + n \frac{I}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + |I|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0,036 \right) (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad \text{IV.8}$$

IV.6 Gestion des énergies

Il est évidemment que l'énergie produite par l'éolienne dépend principalement du vent, qui est très fluctuante en raison du changement aléatoire de la vitesse du vent [74]. Autrement dit, la puissance éolienne produite peut être supérieure ou inférieure à la demande de l'arc de soudage. Afin d'optimiser le système global, une gestion d'énergie doit être établie. Dans notre cas, une stratégie simple est utilisée pour gérer la puissance éolienne entre la demande de l'arc, la batterie et la dissipation. La charge prioritaire est celle de l'arc de soudage ; si il y aura un surplus de puissance, il sera emmagasiné dans les batteries [75, 76]. En effet, nous avons tenu en compte deux contraintes pour la gestion de batterie à savoir :

- L'état de charge (EDC) de la batterie ne doit pas dépasser les 90% afin de protéger la batterie contre les surcharges.
- L'état de charge de la batterie ne doit pas descendre au-dessous de 20% afin de protéger la batterie contre les charges profondes.

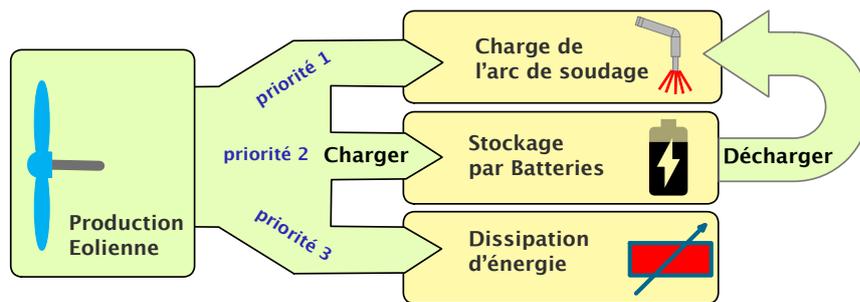


Fig. IV. 6. Structure de la gestion d'énergie

Le rôle principal des batteries est de stocker le surplus d'énergie et de contribuer à alimenter la charge de l'arc durant les périodes d'insuffisance ou d'absence de la production éolienne, comme le montre la figure IV.6 [68, 69]. Le système de stockage par batteries doit être bien dimensionner pour garantir la satisfaction de la demande sur une durée relativement suffisante (une étude de gisement éolien est donc nécessaire pour déterminer la capacité totale du système de stockage).

Comme mentionné précédemment, le banc de batteries doit être protégé contre la surcharge via le contrôle de l'état de charge, s'il dépasse le seuil de 90%, le système de dissipation doit intervenir pour dissiper l'excès d'énergie à travers une résistance de puissance, et faire un équilibre entre la production et la charge [77]. En revanche, si l'état de charge descend au-dessous de 20%, un dispositif de coupure (généralement un relais électromagnétique) est prévu pour couper l'alimentation électrique à la charge. Dans ce cas, la charge de l'arc ne sera pas satisfaite. Pour éviter de tomber dans ce genre de cas, l'autonomie de système de stockage doit être bien étudié. Un Organigramme de la gestion d'énergie selon les règles indiquées en haut est donné par la figure IV.7.

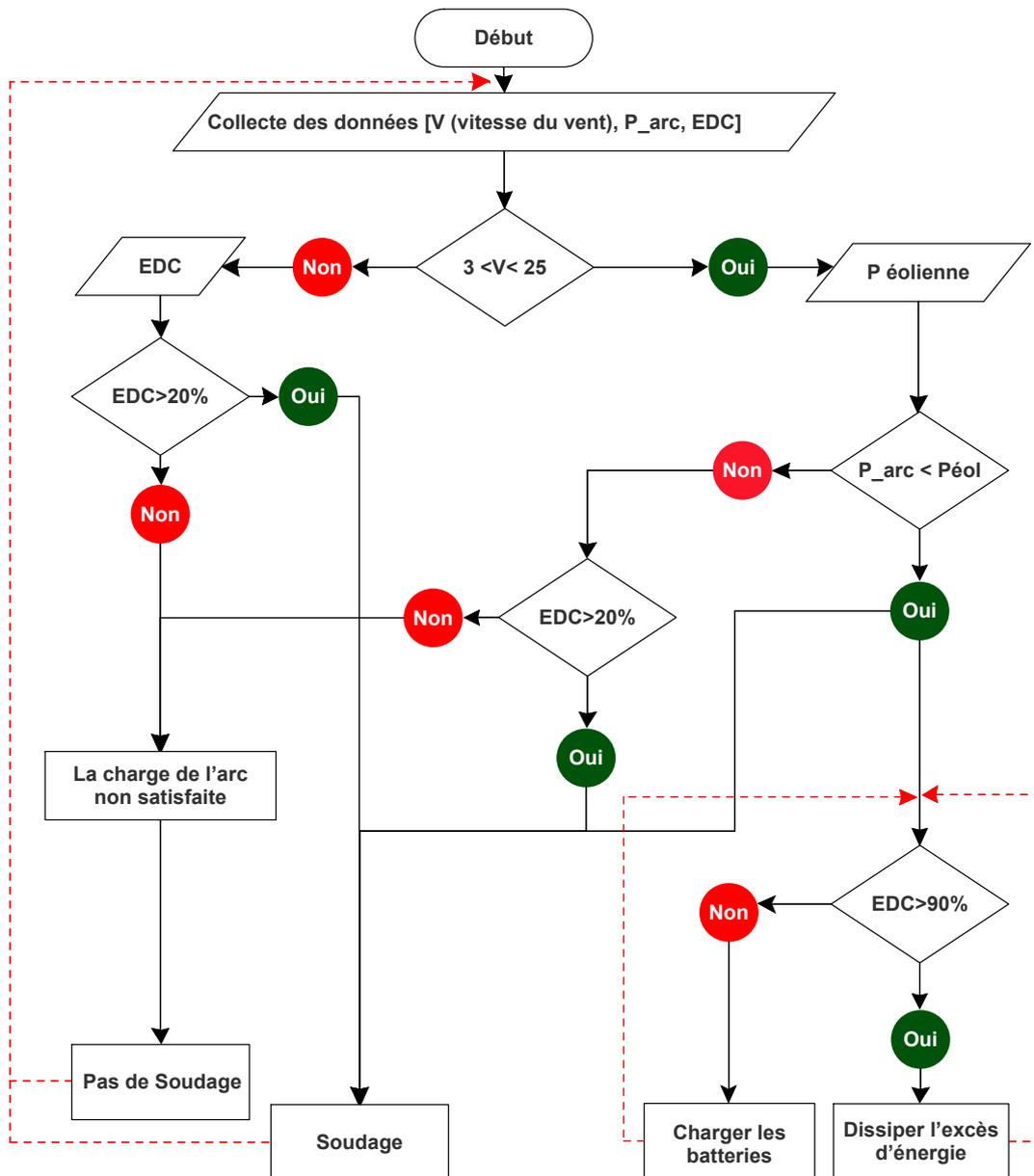


Fig. IV. 7. Organigramme de la gestion d'énergie

IV.7 Contrôle de la tension du bus continu

Pour maintenir la tension du bus continu V_{DC} à sa référence, tout en respectant la gestion d'énergie décrite auparavant, un convertisseur bidirectionnel de type série/parallèle est utilisé à cette fin [58, 78]. Ce convertisseur permet aussi de charger/décharger la batterie. Un schéma de ce système est donné par la Figure IV.8.

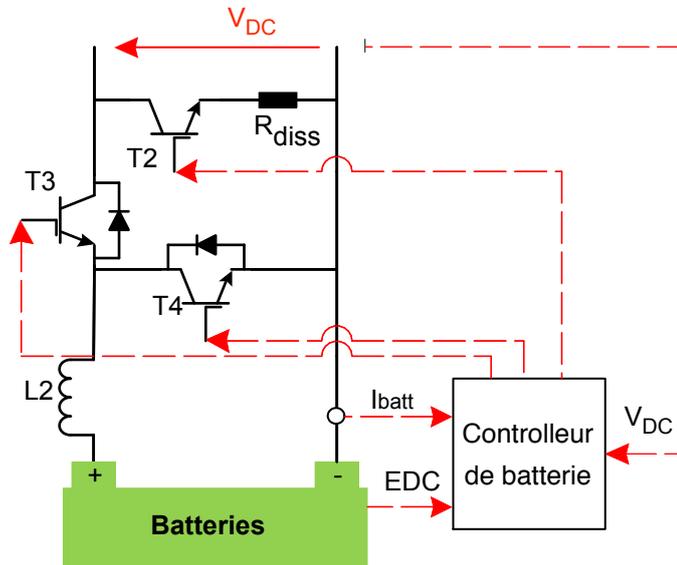


Fig. IV. 8. Système de charge/décharge de la batterie et de dissipation d'énergie

Pour la dissipation d'énergie, un convertisseur statique (composé de transistor T2 avec une résistance de puissance comme le montre la figure IV.8) est ajouté dans le système. Alors, la séquence de commande est donnée comme suit [58] :

- Le mode chargeur est activé lorsque un excès d'énergie est présent, dans ce cas le commutateur T_3 fonctionne en hacheur série, et le commutateur T_4 se comporte comme une diode ;
- Si la batterie est chargée, le hacheur T_2 est activé pour dissiper l'excès d'énergie à travers la résistance de puissance, réaliser un équilibre entre la production éolienne et la consommation de l'arc ;
- Le mode déchargeur est activé lorsque un manque d'énergie éolienne est présent, dans ce cas, la batterie contribue à alimenter la charge de l'arc via le commutateur T_4 qui fonctionne maintenant comme un hacheur parallèle, alors que le commutateur T_3 se comporte comme une diode.

La figure IV.9 représente un schéma global de contrôle basé sur deux régulateurs conventionnels de type PI. L'un est implanté pour maintenir la tension du bus continu V_{DC} constante. L'autre est implanté pour contrôler l'excès d'énergie à dissiper dans la résistance de puissance.

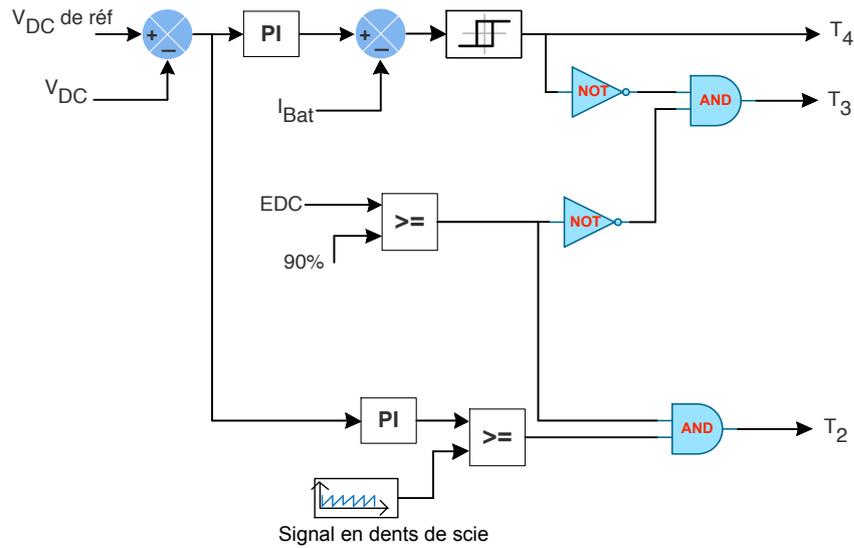


Fig. IV. 9. Schéma de control de la tension V_{dc} , de charge/décharge de la batterie et de dissipation d'énergie

IV.8 Analyse des résultats de la simulation

IV.8.1 Simulation avec vent fort

Le système de soudage à l'arc proposé dans cette thèse a été modélisé puis simulé à l'aide de Matlab/Simulink. Afin de tester la faisabilité et la robustesse de notre générateur de soudage, un profil de vitesse du vent illustré à la Figure IV.10 a été appliqué pendant la période de simulation. avec la même période de simulation, un courant de soudage constant de 150 A est souhaité pour satisfaire la demande de l'arc; il a été également considéré une variation de 10% de la charge de l'arc pendant la procédure de soudage.

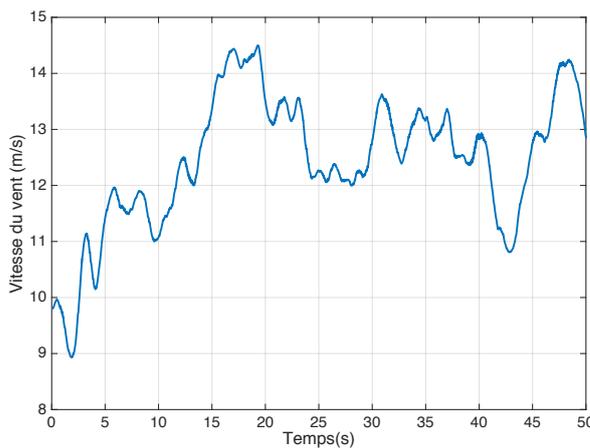


Fig. IV. 10. Profil de la vitesse du vent appliqué

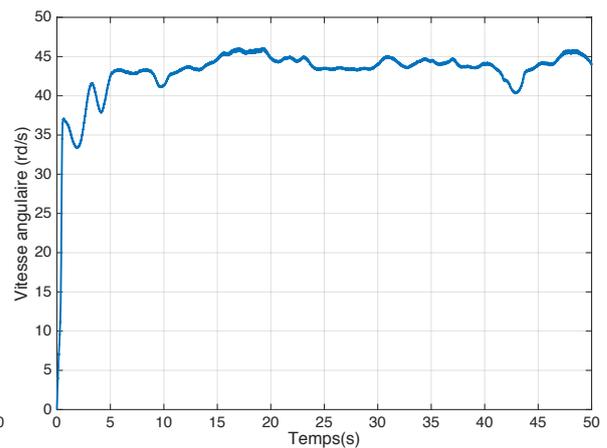


Fig. IV. 11. Vitesse de rotation de la turbine avec MPPT

La Figure IV.12 montre que le courant de soudage suit parfaitement sa référence de 150 A. La qualité du courant de soudage obtenue par le régulateur PI est très satisfaisante malgré

les conditions appliquées de la variation de la vitesse du vent et de la charge de l'arc. Aussi, la tension de soudage chute de sa tension de circuit ouvert (environ 57 V) à une tension basse, environ 15 V, qui correspond à la puissance de la charge, comme le montre la figure IV.13.

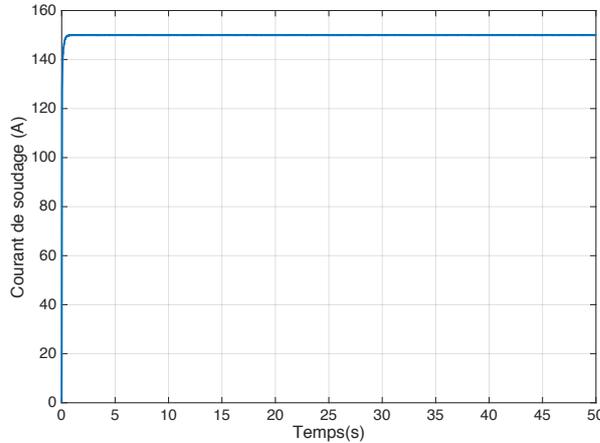


Fig. IV. 12. Courant de l'arc durant la procédure de soudage

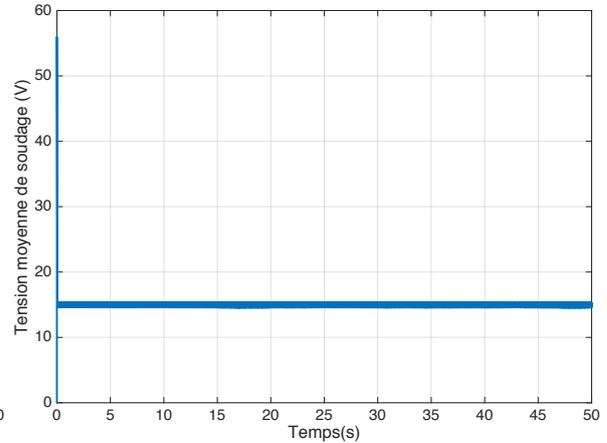


Fig. IV. 13. Tension de l'arc durant la procédure de soudage

La figure IV.11 montre que la technique MPPT appliquée, qui est basée sur l'algorithme TSR a donné de bonnes performances ; et ce à travers le changement de la vitesse de rotation pour maintenir un coefficient de puissance maximale. Donc, le coefficient de puissance est maintenu à sa valeur maximale de 0,48 dans certaines intervalles où la vitesse du vent est inférieure à 12 m/s, comme illustré par la figure IV.14. Cependant, lorsque la vitesse est supérieure à 12 m/s, le système a agi sur l'angle de calage, comme le montre la figure IV.15, pour minimiser la puissance extraite, et la garder constante et égale à la valeur nominale de l'éolienne, environ 8.5 kW.

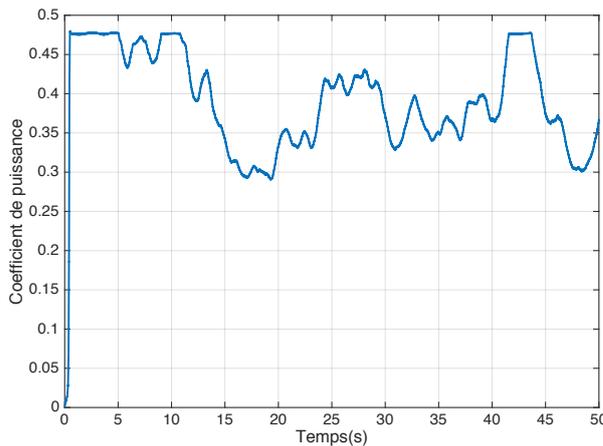


Fig. IV. 14. Coefficient de puissance avec régulation MPPT

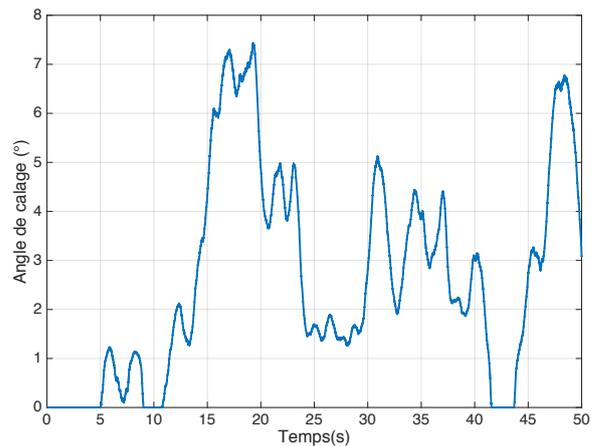


Fig. IV. 15. Angle de calage des pales de la turbine

La figure IV.16 montre que la puissance de l'arc est presque constante sur toute la période de simulation, vu que le courant de soudage est contrôlé pour être constant. D'autre part, vu le profil du vent appliqué est à des vitesses élevées la puissance produite est supérieure

à la demande sur toute la période de simulation ; sur cette période, l'excès de la puissance est envoyé à la batterie, comme le montre l'état de charge de la batterie sur la figure IV.19.

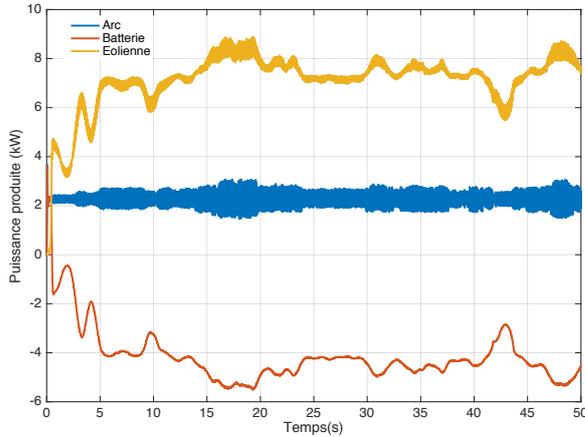


Fig. IV. 16. Gestion de Puissances : de l'Éolienne, Batterie et de l'Arc

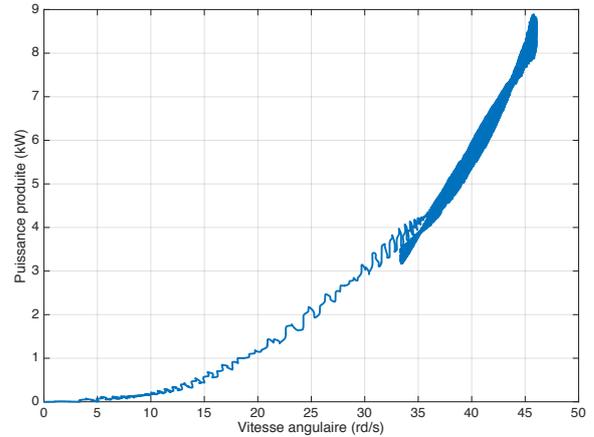


Fig. IV. 17. Puissance produite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

La figure IV.17 représente les points de fonctionnement de la puissance en fonction de la vitesse de rotation. On constate que l'éolienne produit des puissances plus de 3 kW, avec des vitesses de rotation plus de 33 rd/s sur toute la période de simulation.

Le régulateur de type PI implanté pour contrôler la tension du bus DC a donné de bonne performance ; la tension du bus DC est environ $600\text{ V} \pm 0.6\%$. Les figures IV.20 et IV.21 représentent respectivement la tension et le courant de la machine synchrone à aimants permanents en valeurs efficaces.

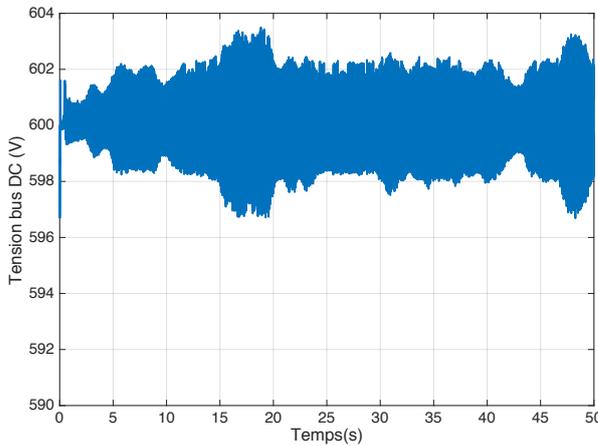


Fig. IV. 18. Tension du bus DC au cours de la procédure de soudage

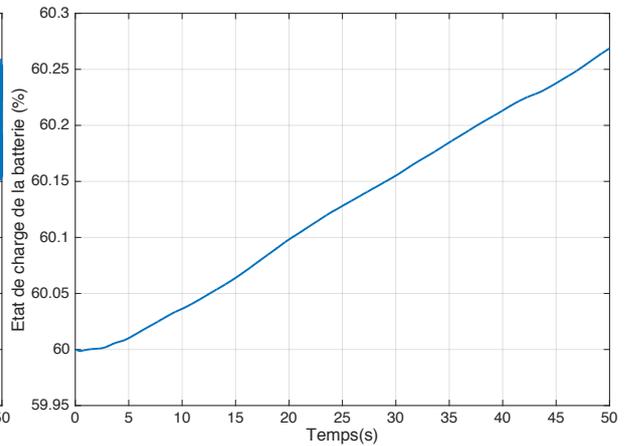


Fig. IV. 19. État de charge de la batterie durant la procédure de soudage

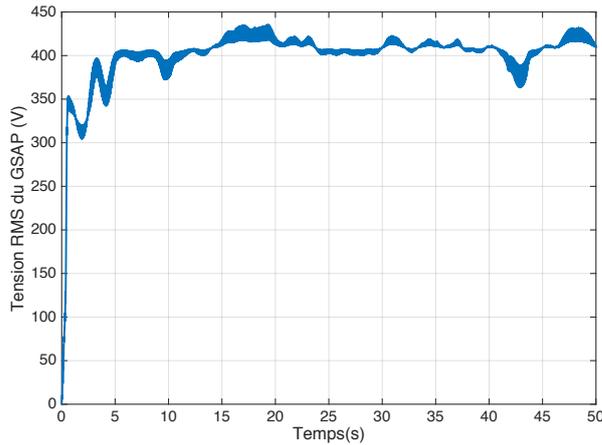


Fig. IV. 20. Tension de la GSAP en valeur efficace durant la production éolienne

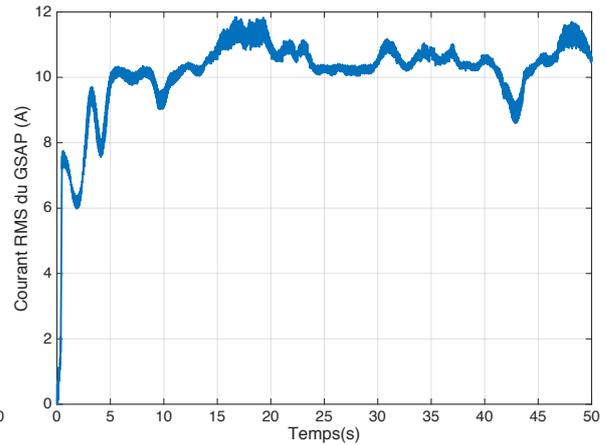


Fig. IV. 21. Courant de la GSAP en valeur efficace durant la production éolienne

IV.8.2 Simulation avec vent très faible

Dans cette partie de la simulation, on applique un profil de vitesse du vent très faible pour examiner le fonctionnement du système. A cet effet, le profil de 50 secondes illustré par la figure IV.22 a été appliqué, en désirant toujours avoir un courant de soudage de 150 A.

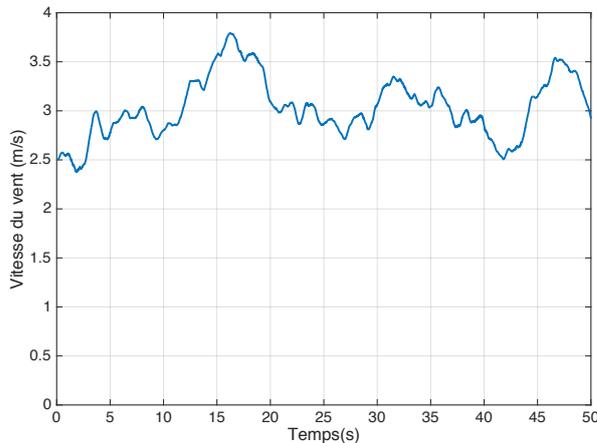


Fig. IV. 22. Profil de la vitesse du vent appliqué

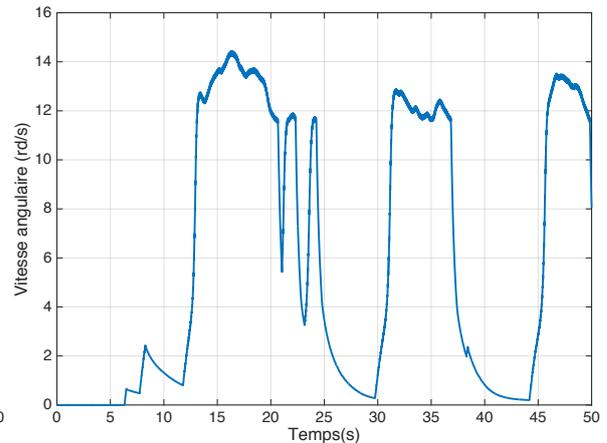


Fig. IV. 23. Vitesse de rotation de la turbine avec MPPT

La Figure IV.24 montre que le courant de soudage suit la référence de 150 A malgré l'insuffisance d'énergie éolienne sur toute la période de simulation. La batterie a contribué considérablement à la satisfaction de la demande de l'arc (voir la figure IV.28).

La figure IV.26 montre qu'il y a des intervalles de temps, où la production éolienne est nulle, vu que l'éolienne ne fonctionne pas avec des vitesses du vent au-dessous de 3 m/s. En dehors de ces intervalles, le système a optimisé la production éolienne à travers un coefficient de puissance maximale et angle de calage maintenu à zéro comme le montre la figure IV.27. On voit sur la figure IV.30 que la tension du bus DC qui alimente l'onduleur de soudage est toujours réglée à sa valeur souhaitée. D'autre part, au cours de cette simulation, les grandeurs

de la machine synchrone à aimants permanents telles que la tension et le courant sont donnés par les figures IV.32 et IV.33.

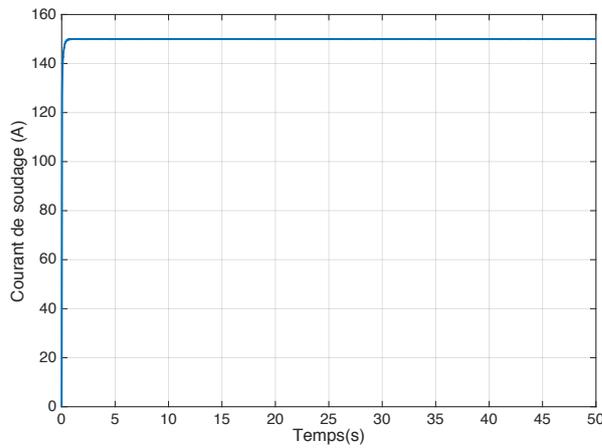


Fig. IV. 24. Courant de l'arc durant la procédure de soudage

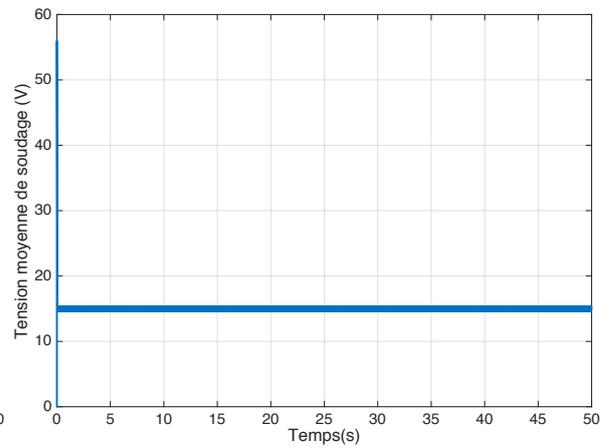


Fig. IV. 25. Tension de l'arc durant la procédure de soudage

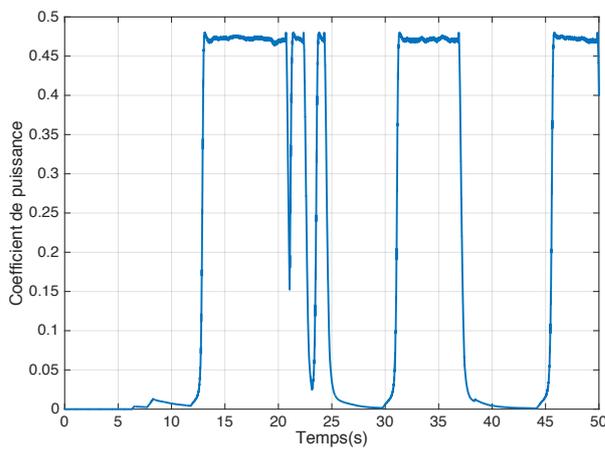


Fig. IV. 26. Coefficient de puissance avec régulation MPPT

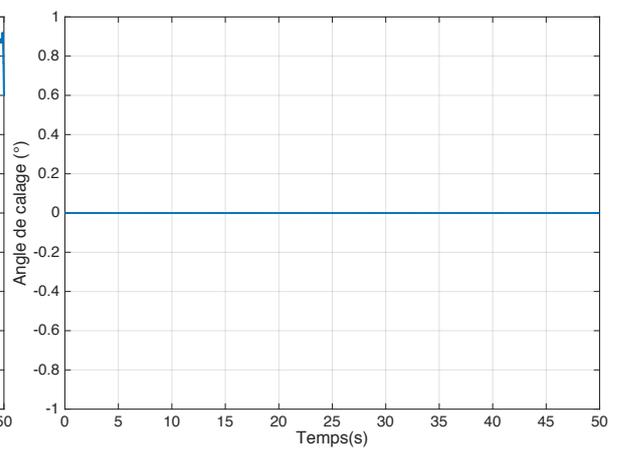


Fig. IV. 27. Angle de calage des pales de la turbine

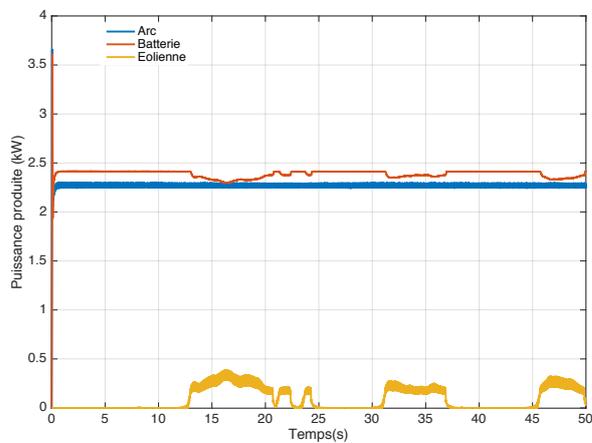


Fig. IV. 28. Gestion de Puissances : de l'Éolienne, Batterie et de l'Arc

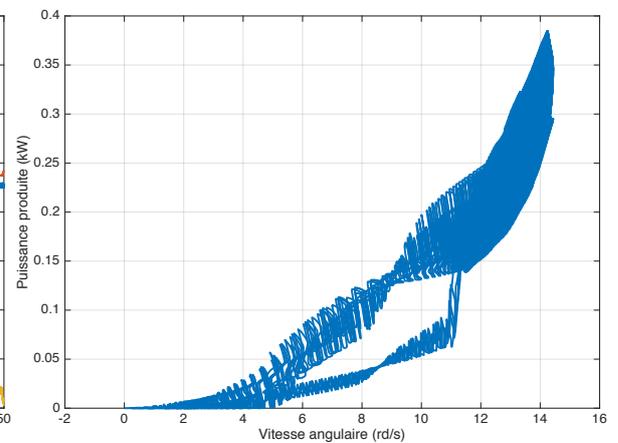


Fig. IV. 29. Puissance produite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

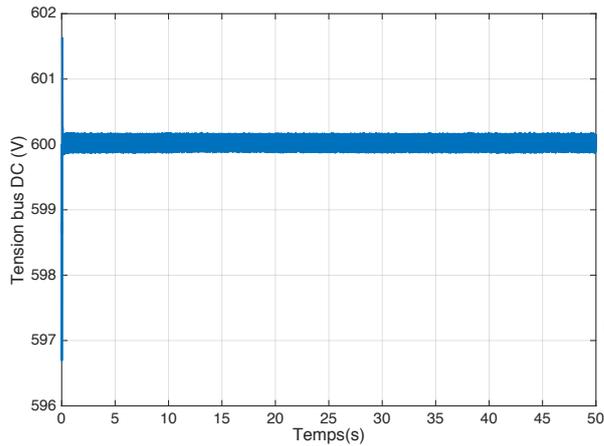


Fig. IV. 30. Tension du bus DC au cours de la procédure de soudage

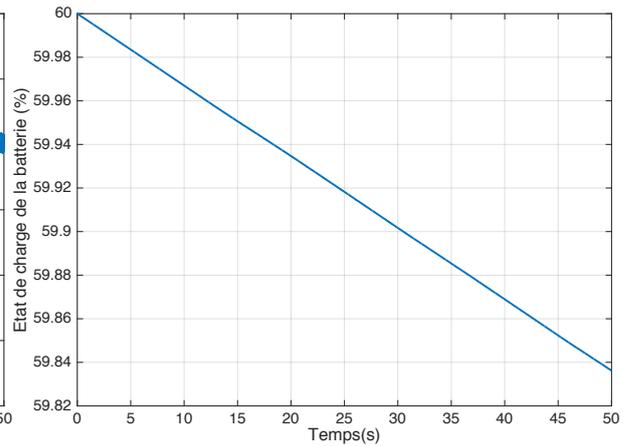


Fig. IV. 31. État de charge de la batterie durant la procédure de soudage

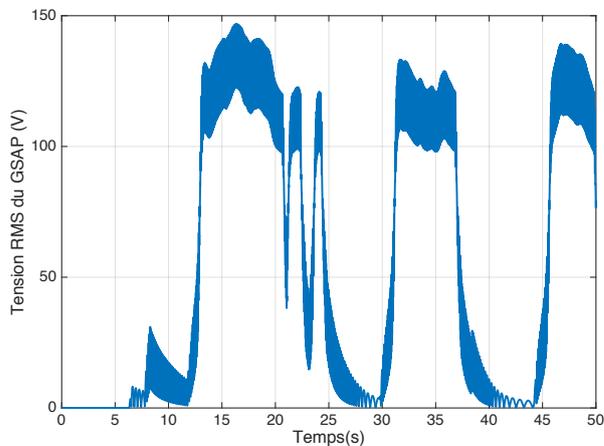


Fig. IV. 32. Tension de la GSAP en valeur efficace durant la production éolienne

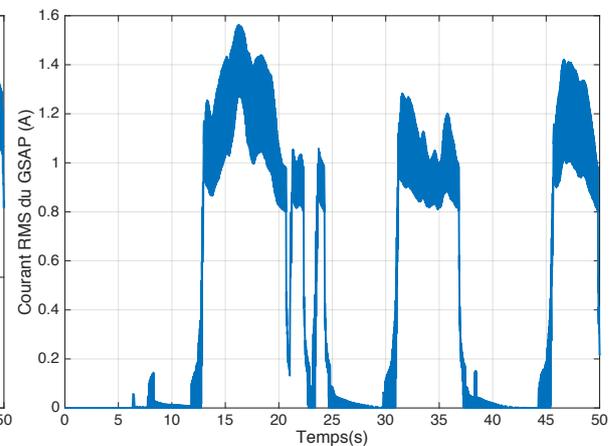


Fig. IV. 33. Courant de la GSAP en valeur efficace durant la production éolienne

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu concevoir un schéma d'un générateur de soudage à l'arc à base d'une petite éolienne de 8.5 kW. Le générateur proposé en effet peut fonctionner de manière autonome, sans besoin du réseau électrique, grâce à sa conception optimale qui inclut des batteries chimiques en Plomb-Acide. Au niveau de la partie éolienne, nous avons choisi une éolienne à génératrice synchrone à aimants permanents couplée directement à la turbine. Cependant, pour faire fonctionner l'éolienne à vitesse variable afin d'optimiser la puissance extraite, nous avons appliqué la technique de poursuite de la puissance maximale (MPPT) appelée TSR (Tip Speed Ratio). Au niveau de l'étage de soudage, nous avons utilisé un onduleur de soudage à architecture en pont complet afin de contrôler le courant de l'arc. A la fin du chapitre, un algorithme de gestion d'énergie a été élaboré pour satisfaire la demande de l'arc à tout moment aux bonnes conditions de fonctionnement. Tout le système a été modélisé, puis simulé sous Matlab/Simulink. Les résultats de la simulation ont montré la faisabilité et l'efficacité du système de soudage proposé.

DISCUSSION

Le travail présenté dans cette thèse consiste à concevoir un poste à souder à l'arc à base d'une source énergétique renouvelable comme une alternative des postes à souder à base de groupe diesel, appelés gen-set arc welding machines. En effet, le diesel présente beaucoup de problème techniques, économiques et environnementaux. Notre choix était de remplacer le groupe diesel par un système éolien afin de bénéficier des avantages de l'éolienne et de diversifier les sources énergétiques, notamment dans les régions isolés du réseau électrique de distribution.

D'autres sources énergétiques renouvelables peuvent aussi être utilisées, comme le photovoltaïque. Le photovoltaïque en effet est plus avantageux par rapport au éolien surtout sur le plan de la disponibilité du gisement. Autrement dit, le gisement solaire est disponible partout, au contraire le gisement éolien qui se trouve dans quelques régions, ce qui limite son exploitation. Néanmoins, le choix de l'éolienne dans cette étude est justifié par le fait que le poste à souder proposé est destiné pour les ateliers de soudage immobiles. Donc, une étude de gisement éolien est nécessaire avant l'implantation de l'éolienne pour rentabiliser le système. Plusieurs études du gisement éolien ont été faites sur l'Algérie, et peuvent être exploitées pour cibler les régions favorables pour notre système. Souvent, Une vitesse moyenne-annuelle minimale du vent de 6 m/s est recommandée, et ce pour minimiser la capacité de stockage. Effectivement, le stockage par batterie est un élément indispensable dans notre système vu le caractère aléatoire du vent et l'intermittence de la puissance éolienne produite. Pour cela, le dimensionnement du banc des batteries doit être bien étudié en fonction de la capacité du gisement éolien et de la capacité de l'éolienne, pour ne pas tomber dans des heures sans énergies éolienne et à batteries vides. Alors, plus le gisement éolien est grand, plus la capacité de stockage est petite pour même autonomie de batteries. Généralement une autonomie de 15 jours est suffisante pour passer les jours calmes sans vent de l'année.

L'étude de gisement éolien et l'étude de dimensionnement de stockage n'ont pas fait l'objet de cette thèse, puisque elles sont liées à l'endroit où l'éolienne est installée. Par contre, notre étude est globale et son objectif est la conception d'un poste à souder à base d'une éolienne. Dans les simulations réalisées dans cette étude, nous avons imposé un courant de soudage de 150 A, ce qui exige une demande de 2.2 kW. Sur cette valeur que nous avons dimensionné la capacité de l'éolienne (8.5 kW, et presque quatre fois plus grande que la demande de l'arc de soudage). Ce choix peut être rectifié par une étude de dimensionnement

de tout le système (l'éolienne et la batterie) en fonction du gisement disponible dans la région en question et l'autonomie adoptée.

Le poste à souder proposé a été modélisé et puis examiné sous deux conditions. La première consiste à imposer un profil de vitesse du vent faible, et la deuxième consiste à imposer un profil de vitesse du vent élevé. Dans toutes les conditions, nous avons pris en compte une variation de la résistance de l'arc de 10 à 30 % au cours de la procédure de soudage. Cela permettra à tester la fiabilité du système en conditions extrêmes. Cette variation de la résistance de l'arc est généralement due à l'erreur dans la longueur de l'arc. Finalement, toutes les résultats des simulations ont bien montrés la faisabilité de notre poste à souder.

Notre poste à souder est en effet comprend une seule éolienne à génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) de plusieurs paires de pôles et à entraînement direct. Cette conception nous permettra d'exploiter les meilleurs performances de la GSAP, tout en évitant le cout du multiplicateur mécanique.

D'autre part, pour extraire le maximum de puissance éolienne, nous avons utilisé la technique TSR, en raison de son faible coût. Cependant, beaucoup de techniques de MPPT peuvent être utilisées. Du coté limitation de la puissance en cas des vitesses du vent élevées, nous avons implanté une régulation proportionnelle pour orienter les pales de la turbines à travers des moteurs électriques (Pitch control). Mais cette option peut être évitée en choisissant un système active stall, qui n'exige pas des moteurs et régulation électriques, et par conséquent, on évite des coûts supplémentaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans les sites isolés non desservis par le réseau électrique de distribution, le diesel reste encore la source énergétique majoritaire pour la production électrique. Cependant, ce type d'énergie pose énormément de problèmes techniques, économiques et environnementaux. Dans la présente thèse, un système alternatif basé sur une éolienne a été proposé pour les applications de soudage à l'arc. En effet, nous avons pu concevoir un générateur de soudage à l'arc en se basant sur une petite éolienne à génératrice synchrone à aimants permanents à entraînement direct. Il a été noté que la chaîne de conversion éolienne basée sur une GSAP à grand nombre de pôles est plus économique et plus adaptée aux applications de soudage, en raison du nombre minimal des convertisseurs de puissance utilisés. Généralement pas besoin d'installer un onduleur pour convertir la tension en alternatif, vu que le poste à souder est une alimentation à courant continu (DC).

Les génératrices synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles apportent une solution intéressante pour leur utilisation dans la chaîne de conversion éolienne. En effet, ce type de générateurs présentent plusieurs avantages par rapport aux autres générateurs comme la machine à double alimentation. Généralement, l'éolienne à GSAP n'a pas besoin du multiplicateur mécanique pour augmenter la vitesse de rotation de la turbine et l'adapter à la vitesse du générateur ; ce qui rend l'éolienne légère, compact et économique. La GSAP offre également des meilleures performances énergétiques et ne nécessite à aucun système d'excitation, ce qui limite énormément les interventions d'entretien et de maintenance sur la machine. De plus, les éoliennes à GSAP peuvent facilement fonctionner à vitesse de rotation variable ; ce qui permet de produire plus d'énergie électrique avec la technique de poursuite de point de la puissance maximale, de diminuer les contraintes mécaniques sur l'éolienne, et par la suite augmenter sa durée de vie.

En revanche, le problème de fluctuation ou d'absence de la production éolienne a été résolu par trois systèmes. Le premier système consiste à mettre en place des batteries de stockage en plomb-Acide, afin de rendre le système autonome. En effet, la batterie est un élément indispensable sans doute dans notre système ; elle emmagasine l'excès d'énergie produite ; puis elle contribue à satisfaire la demande de l'arc aux moments d'insuffisance ou

d'absence de l'énergie éolienne. Le second système consiste à optimiser la puissance produite à travers l'implantation d'un hacheur survolteur, commandé par l'algorithme TSR (*Tip Speed Ratio*) afin de poursuivre le point de puissance maximale (MPPT). La stratégie TSR modifie la vitesse angulaire de l'éolienne pour chaque vitesse du vent, afin de maintenir la vitesse spécifique optimale. Le dernier système est un dispositif d'orientation des pales pour limiter la puissance aérodynamique recueillie par la turbine à la puissance nominale, pour les vitesses du vent élevées. Pour cela nous avons décrit un simple régulateur qui va permettre de contrôler l'angle de calage des pales, afin de protéger la GSAP et les convertisseurs statiques contre les surcharges.

D'autre part, Le soudage à l'arc nécessite une tension à vide assez faible de 50 à 70, avec une importante intensité de courant, de plusieurs centaines d'ampères. A cet effet, un onduleur de soudage à topologie de pont complet (pont en H) a été adopté dans cette thèse pour le procédé SMAW (Soudage à arc à l'électrode enrobée), car ce type d'onduleur répond pleinement aux exigences des postes à souder modernes. Les onduleurs de soudage sont des convertisseurs de puissance DC/DC à découpage utilisant des transformateurs abaisseurs en ferrite pour fonctionner en haute fréquence. Ce type d'onduleur permet de déminuer considérablement le volume et le poids de l'équipement de soudage ; permet également de mieux contrôler les paramètres électriques de soudage tels que la tension, le courant et ces formes d'onde. Du côté commande, nous avons utilisé un régulateur PI pour maintenir le courant de soudage constant, tout en tenant en compte des perturbations au niveau de la résistance de soudage, qui sont dues généralement au changement de la longueur de l'arc.

Le générateur de soudage proposé avec tous ses composants, à savoir, la turbine, la GSAP, la batterie de stockage, l'onduleur de soudage et les autres convertisseurs de puissance, a été modélisé et simulé à l'aide de l'outil Matlab/Simulink. Pour tester convenablement le comportement et la robustesse de notre système, une turbulence moyenne sur la vitesse du vent, et une perturbation de 10% au niveau la résistance de l'arc ont été appliquées pendant la procédure de soudage. Les résultats de la simulation montrent que le générateur de soudage conçu à base d'une éolienne à GSAP peut fournir un courant de soudage stable, même dans des conditions variables de la résistance de l'arc et la vitesse du vent. Les résultats de la simulation prouvent également la faisabilité et l'efficacité du système proposé. Selon ces résultats, le système éolien proposé peut remplacer le groupe de soudage actuellement utilisé dans les régions isolées ; donc mettre fin aux problèmes du diesel.

Suite aux travaux réalisés dans cette thèse, on peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances du générateur de soudage proposé :

- Étudier la possibilité de se baser sur un système hybride éolien photovoltaïque au lieu à un seul système éolien, afin d'avoir plus de fiabilité de production électrique.
- Développer d'autres méthodes MPPT plus performantes.

RÉFÉRENCES

- [1] L. Barote, C. Marinescu, and M. N. Cirstea, "Control Structure for Single-Phase Stand-Alone Wind-Based Energy Sources," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 764-772, 2013.
- [2] N. Mendis, K. M. Muttaqi, S. Sayeef, and S. Perera, "Standalone Operation of Wind Turbine-Based Variable Speed Generators With Maximum Power Extraction Capability," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 822-834, 2012.
- [3] T. Ackermann, *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons, 2005.
- [4] C. Lumbreras, J. M. Guerrero, P. García, F. Briz, and D. D. Reigosa, "Control of a Small Wind Turbine in the High Wind Speed Region," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 10, pp. 6980-6991, 2016.
- [5] J. Shklovski and K. Janson, "Development of constant-power source for arc welding," in *2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference*, 2012, pp. 255-258.
- [6] D. Sha and X. Liao, "Digital control of switch-mode pulsed GMAW welding power," in *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 2746-2749.
- [7] J.-r. Yan, H.-k. Liu, P. Liao, L. Gan, and L.-j. Liu, "H₂/H_∞ Robust Controller of the Arc Welding Inverter Power," *JCP*, vol. 6, no. 4, pp. 705-710, / 2011.
- [8] A. Bendre, G. Venkataramanan, and D. Divan, "Dynamic analysis of loss-limited switching full-bridge DC-DC converter with multimodal control," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 854-863, 2003.
- [9] S. Narula, B. Singh, G. Bhuvaneswari, and R. Pandey, "Improved Power Quality Bridgeless Converter-Based SMPS for Arc Welding," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 275-284, 2017.
- [10] S. Narula, G. Bhuvaneswari, and B. Singh, "A modular converter for welding power supply with improved power quality," in *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2012, pp. 1-4.
- [11] S. Narula, B. Singh, and G. Bhuvaneswari, "Power Factor Corrected Welding Power Supply Using Modified Zeta Converter," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 2, pp. 617-625, 2016.
- [12] J. Zhu, W. Liang, and Y. Shi, "Study on the dynamic process of arc welding inverter," in *Third International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 308-311.
- [13] A. C. Davies, *The Science and Practice of Welding*, volume 1, *Welding science and technology*, 10th ed. Cambridge University Press, 1992.

- [14] Y. M. Chae, J. S. Gho, G. H. Choe, W. S. Shin, and J. Y. Choi, "PWM converter-inverter arc welding machine using new type NCT," in 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Fukuoka, Japan, May 1998, vol. 2, pp. 1636-1641.
- [15] A. K. Paul, "Robust Product Design Using SOSM for Control of Shielded Metal Arc-Welding (SMAW) Process," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 3717-3724, 2016.
- [16] M. Pinard, *Convertisseurs et électronique de puissance* Paris: Dunod, 2007.
- [17] A. Navarro-Crespin, V. M. Lopez, R. Casanueva, and F. J. Azcondo, "Digital Control for an Arc Welding Machine Based on Resonant Converters and Synchronous Rectification," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 2, pp. 839-847, 2013.
- [18] **B. Boussiala, M. O. Mahmoudi, and L. Nezli, "Study and control of PWM arc welding inverter based on a microcontroller," presented at the 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN), Antalya, Turquie, 2015.**
- [19] B. Boukhezzar and H. Siguerdidjane, "Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines," Control Engineering Practice, vol. 18, no. 12, pp. 1357-1368, 2010.
- [20] F. Deng, D. Liu, Z. Chen, and P. Su, "Control strategy of wind turbine based on permanent magnet synchronous generator and energy storage for stand-alone systems," Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 51-62, 2017.
- [21] C. N. Bhende, S. Mishra, and S. G. Malla, "Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Standalone Wind Energy Supply System," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, no. 4, pp. 361-373, 2011.
- [22] J. M. Wang, S. T. Wu, S. C. Yen, and H. J. Chiu, "A Simple Inverter for Arc-Welding Machines With Current Doubler Rectifier," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 11, pp. 5278-5281, 2011.
- [23] **B. Boussiala, L. Nezli, M. O. Mahmoudi, and A. Deboucha, "Novel welding machine based on small PMSG wind turbine," Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 10, no. 5, p. 053304, 2018.**
- [24] A. Petersson, *Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines*. Chalmers University of Technology, 2005.
- [25] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.-A. Cutululis, and E. Ceanga, *Optimal control of wind energy systems: towards a global approach*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [26] F. D. Bianchi, H. de Battista, and R. J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer London, 2007.
- [27] M. R. Patel, *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. CRC press Taylor, 2006.
- [28] "Rapport annuel 2017 sur l'énergie éolienne," disponible sur <http://gwec.net>.
- [29] "Global Small Wind Statistics 2017 " disponible sur <https://wwindea.org>.
- [30] "Parc de production d'origine énergies renouvelables de l'Algérie en 2018," <http://www.sktm.dz>.
- [31] "Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie 2015-2030 " <http://www.sonelgaz.dz>.

- [32] 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 Doctorat, Université de Tlemcen, 2013.
- [33] F. Chellali, "Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie," Thèse de Doctorat, ENP d'Alger, 2011.
- [34] N. Kasbadji Merzouk, "Évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie " Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2006.
- [35] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, "Wind energy handbook," ed: John Wiley & Sons Chichester, 2001.
- [36] R. W. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. Wiley, 2004.
- [37] S. A. Vendan, L. Gao, A. Garg, P. Kavitha, G. Dhivyasri, and S. Rahul, "Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources," ed: Springer, 2018.
- [38] R. Cazes. Soudage à l'arc, (B 7 730). Techniques de l'Ingénieur.
- [39] K. Weman, Welding Processes Handbook. Taylor & Francis, 2003.
- [40] E. L. Guen, "Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG: Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique," thèse de Doctorat, Université de BRETAGNE-SUD, 2010.
- [41] J. S. Thomsen, "Advanced control methods for optimization of arc welding," thèse de doctorat, Department of Control Engineering, Aalborg University, 2004.
- [42] M. Vural, "Welding Processes and Technologies," in Comprehensive Materials Processing, Oxford: Elsevier, 2014, pp. 3-48.
- [43] J. Norrish, "3 - Welding power source technology," in Advanced Welding Processes, J. Norrish, Ed.: Woodhead Publishing, 2006, pp. 26-43.
- [44] A. I. Pressman, K. Billings, and T. Morey, Switching power supply design, 3rd ed. McGraw-Hill, Inc., 2009.
- [45] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. Pearson, 2009.
- [46] G. Séguier, F. Labrique, and P. Delarue, Electronique de puissance : structures, commandes, applications. Paris: Dunod, 2015.
- [47] K. Morimoto, D. Toshimitsu, H. Manabe, N. A. Ahmed, L. Hyun-Woo, and M. Nakaoka, "Advanced High Power DC-DC Converter using Novel Type Half-Bridge Soft Switching PWM Inverter with High Frequency Transformer for Arc Welder," in 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005, vol. 1, pp. 113-118.
- [48] A. M. D. Broe, S. Drouilhet, and V. Gevorgian, "A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1630-1635, 1999.
- [49] K. Lo, Y. Chen, and Y. Chang, "MPPT Battery Charger for Stand-Alone Wind Power System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 6, pp. 1631-1638, 2011.
- [50] H. Habibi, H. Rahimi Nohooji, and I. Howard, "Optimum efficiency control of a wind turbine with unknown desired trajectory and actuator faults," Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 9, no. 6, p. 063305, 2017.

- [51] Y. Song, Z. Zhang, P. Li, W. Wang, and M. Qin, "Robust adaptive variable speed control of wind power systems without wind speed measurement," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 6, p. 063115, 2013.
- [52] Y. Errami, M. Maaroufi, and M. Ouassaid, "Modelling and control strategy of PMSG based variable speed wind energy conversion system," in *International Conference on Multimedia Computing and Systems*, 2011, pp. 1-6.
- [53] Y. Errami, M. Benchagra, M. Hilal, M. Maaroufi, and M. Ouassaid, "Control strategy for PMSG wind farm based on MPPT and direct power control," in *2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems*, 2012, pp. 1125-1130.
- [54] J.-P. Louis, *Modélisation des machines électriques en vue de leur commandes*. paris: LAVOISIER,, 2004.
- [55] A. Urtasun, P. Sanchis, I. San Martín, J. López, and L. Marroyo, "Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking," *Renewable Energy*, vol. 55, pp. 138-149, 2013/07/01/ 2013.
- [56] E. N. López-Ortiz, D. Campos-Gaona, and E. L. Moreno-Goytia, "Modelling of a wind turbine with permanent magnet synchronous generator," in *North American Power Symposium (NAPS)*, 2012, pp. 1-6.
- [57] H. Habibi, H. R. Nohooji, and I. Howard, "Constrained control of wind turbines for power regulation in full load operation," in *11th Asian Control Conference (ASCC)*, 2017, pp. 2813-2818.
- [58] S. M. Allam, M. F. Elmorshedy, and E. M. Rashad, "Load power and state-of-charge management strategy with MPPT of wind-driven isolated PMSG," in *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1098-1104.
- [59] L. Shanzhi, W. Haoping, T. Yang, and A. AITOUICHE, "A RBF neural network based MPPT method for variable speed wind turbine system," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 21, pp. 244-250, 2015.
- [60] A. Bektache and B. Boukhezzar, "Nonlinear predictive control of a DFIG-based wind turbine for power capture optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 101, pp. 92-102, 2018.
- [61] B. Boukhezzar and H. Siguerdidjane, "Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 149-162, 2011.
- [62] H. Habibi, H. R. Nohooji, and I. Howard, "Adaptive PID Control of Wind Turbines for Power Regulation With Unknown Control Direction and Actuator Faults," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 37464-37479, 2018.
- [63] S. Sabzevari, A. Karimpour, M. Monfared, and M. B. Naghibi Sistani, "MPPT control of wind turbines by direct adaptive fuzzy-PI controller and using ANN-PSO wind speed estimator," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, p. 013302, 2017.
- [64] C. Sloth, T. Esbensen, and J. Stoustrup, "Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines," *Mechatronics*, vol. 21, no. 4, pp. 645-659, 2011.
- [65] D. Song, J. Yang, Z. Cai, M. Dong, M. Su, and Y. Wang, "Wind estimation with a non-standard extended Kalman filter and its application on maximum power extraction for variable speed wind turbines," *Applied energy*, vol. 190, pp. 670-685, 2017.

- [66] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Dynamic response of a stand-alone wind energy conversion system with battery energy storage to a wind gust," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 1, pp. 73-78, 1997.
- [67] D. Lee and L. Wang, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 311-320, 2008.
- [68] D. K. V. Sagiraju, Y. P. Obulesu, and S. B. Choppavarapu, "Dynamic performance improvement of standalone battery integrated PMSG wind energy system using proportional resonant controller," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 1353-1365, 2017/08/01/ 2017.
- [69] G. Shi, Y. F. Cao, Z. Li, and X. Cai, "Impact of wind-battery hybrid generation on isolated power system stability," in *SPEEDAM 2010*, 2010, pp. 757-761.
- [70] **B. Boussiala, A. Boutaghane, and M. Ouadah, "Contribution de Certains Formalismes Vectoriels à la Modélisation des Machines Asynchrones destinées aux postes de soudage à l'arc," presented at the Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, IC-WNDT-MI'14, Annaba, Algeria, 2014.**
- [71] J. Seong-Jeub and C. Gyu-Hyeong, "Zero-voltage and zero-current switching full bridge DC-DC converter for arc welding machines," *Electronics Letters*, vol. 35, no. 13, pp. 1043-1044, 1999.
- [72] M. Ceraolo, "New dynamical models of lead-acid batteries," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1184-1190, 2000.
- [73] J. B. Copetti, E. Lorenzo, and F. Chenlo, "A general battery model for PV system simulation," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 1, no. 4, pp. 283-292, 1993.
- [74] Z. Hassiba, L. Cherif, and M. Ali, "Optimal Operational Strategy of Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification of a Remote Algeria," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 1060-1069, 2013/01/01/ 2013.
- [75] N. A. Schinas, N. A. Vovos, and G. B. Giannakopoulos, "An Autonomous System Supplied Only by a Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 325-331, 2007.
- [76] K. Tan and S. Islam, "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 392-399, 2004.
- [77] I. D. Margaritis, S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziargyriou, A. D. Hansen, and P. Sorensen, "Frequency Control in Autonomous Power Systems With High Wind Power Penetration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 189-199, 2012.
- [78] M. Dahmane, J. Bosche, and A. El-Hajjaji, "Control of Wind Conversion System Used in Autonomous System," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 482-491, 2014/01/01/ 2014.

ANNEXE

Tableau 1 : Paramètres de la turbine

Puissance nominale	8.5 kW
Rayon du rotor	2.3 m
Vitesse nominale du vent	12 m/s
Vitesse de démarrage	3 m/s
Vitesse de l'arrêt	25 m/s
Angle de calage	-2° à 30°

Tableau 2 : Paramètres de la GSAP

Puissance nominale	8.5 kW
Résistance statorique	0.42 Ω
Inductance statorique L_d, L_q	8.5 mH
Flux magnétique permanent	0.43 Wb
Nombre de paires de pôles	5

Tableau 3 : paramètres de l'onduleur de soudage

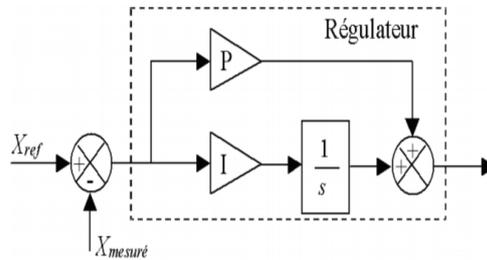
Courant de soudage maximale	200 A
Tension de soudage à vide	65 V
Charge de l'arc	0.1 Ω
Inductance de lissage	200 μ H
Rapport cyclique	0 – 40 %

Tableau 4 : paramètres des régulateurs

Régulateur PI de MPPT	$K_p = 12; K_i = 0.5$
Régulateur PI de courant de soudage	$K_p = 0.005; K_i = 0.04$
Régulateur proportionnel de l'angle de calage	$K_\beta = 150$

Calcul d'un régulateur *PI* avec compensation :

La conception du régulateur *PI* est basée sur la compensation de la constante de temps de ce dernier avec celle du processus de la grandeur à réguler



La forme du correcteur est la suivante :

$$C_s = k_p + \left(\frac{k_i}{s}\right)$$

avec:

- k_p : est le gain proportionnel du régulateur;
- k_i : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction de transfert suivante pour un processus associé à ce correcteur:

$$F(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

En boucle ouverte, on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(s) = K \frac{k_p + \left(\frac{k_i}{s}\right)}{1 + \tau s} = \frac{K(k_p s + k_i)}{s(1 + \tau s)} = K k_i \frac{1 + \frac{k_p s}{k_i}}{s(1 + \tau s)}$$

On prend

$$\tau = \frac{k_p}{k_i}$$

Alors

$$F_{BO}(s) = \frac{k_i K}{s}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit:

$$F_{BF}(s) = \frac{k_i K}{k_i K + s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_i K} s}$$

Pour atteindre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut :

$$t_r = 3 \frac{1}{k_i K}$$

Or

$$k_i = \frac{k_p}{\tau}$$

alors

$$t_r = 3 \frac{\tau}{k_p K}$$

D'où

$$\begin{cases} k_p = 3 \frac{\tau}{t_r K} \\ k_i = \frac{3}{t_r K} \end{cases}$$