

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2015

Faculté des sciences de l'ingénierat  
Département d'électrotechnique

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT DE TROISIEME CYCLE

### MODELISATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE-ÉOLIENNE

Option

Gestion et Qualité de l'Énergie Électrique

Par

DJELLAD Abdelhak

DEVANT LE JURY

<b>PRESIDENT:</b>	Pr. OUARI Ahmed	Prof.	Université de Annaba
<b>Rapporteur :</b>	Dr. SOLTANI Fatma	MCA	Université de Annaba
<b>Co-encadreur :</b>	Dr. LOGERAIS Pierre-Olivier	MCA	Université de Paris-Est Créteil (France)
<b>EXAMINATEURS:</b>	Pr. LABAR Hocine	Prof.	Université de Annaba
	Pr. SAAD Salah	Prof.	Université de Annaba
	Dr. LEMZADMI Ahcène	MCA	Université de Guelma
<b>MEMBRE INVITE :</b>	Pr. OMEIRI Amar	Prof.	Université de Annaba

## الخلاصة

إن استخدام الطاقات المتجددة يقتضي معرفة وسائل إنتاج وتحويل الطاقة. على غرار هذا السياق، تم دراسة وتحليل نظامين منفصلين لتحويل الطاقة (طاقة الرياح- الكهروضوئية)، وذلك بالاستعانة بقوانين ذات طابع دقيق.

في البداية تم تقديم تحليل مفصل عن سلسلة تحويل طاقة الرياح وذلك باستعمال مولد مترامن ذو المغناطيس الدائم (GSAP). إن استخدام المولد الهوائي المترامن وذو المغنطة الدائمة يجعل نظم تحويل طاقة الرياح بسرعات مختلفة أكثر جاذبية من تلك التي تتميز بسرعات ثابتة، لإمكانية استخراج الطاقة المثلى في مختلف الظروف. نظرا للطبيعة المتقلبة للرياح التي تسبب التغيير المتكرر في تردد الجهد الكهربائي للمولد، يتحتم اللجوء لربطه مع الحمولة بواسطة محولات إلكترونية ثابتة. يؤدي استخدام هذه المحولات الإلكترونية للطاقة الى مشاكل متعلقة بالاضطرابات والتشوه التوافقي للحمولة. التلوث التوافقي الملاحظ عند المخرج قد تم خفضه من خلال استعمال المرشح السلبي الذي يسمح لنا بإعطاء ( $THD < 5\%$ )، وبالتالي فإن هذه النتيجة المحققة تستجيب الى المعايير الدولية التي تضمن الحصول على نوعية جيدة للطاقة التي يتم تزويد بها الحمولة.

ثم بعد ذلك تم دراسة وتحليل نظام تحويل الطاقة الضوئية مع تخزين هذه الطاقة عن طريق المكثفات الفائقة. تحليل المردود الطاقوي والزمني خلال دور سمح لنا بتحديد عتبات الانطلاق لعملية الشحن والتفريغ مما يسمح بدوره بإعطاء النقل الأمثل بين مصدر الطاقة والحمولة بمردود طاقي قدر بـ 93%.

بالإضافة، هذان النموذجين الدقيقين يمكن استخدامهما في أغراض أخرى كالحسابات المثلى أو استعمالهما في الأنظمة الهجينة الخاصة بإنتاج أو تخزين الطاقة.

### الكلمات المفتاحية

طاقة الرياح، مولد مترامن ذو المغناطيس الدائم (GSAP)، التحليل، الطاقة الكهروضوئية، المكثفات الفائقة، تخزين، مردود طاقي.

## **Abstract**

The implementation of renewable energies requires the knowledge of the means of energy production and transformation. In this context, two conversion systems of intermittent energy (wind-photovoltaic) are modeled with fine laws of behavior.

The modeling of a chain of wind energy conversion using a permanent magnet synchronous generator (PMSG) is presented. The use of the permanent magnet synchronous generator makes wind conversion systems, at different speeds, more attractive than those with fixed speeds, due to the extraction of potential energy in optimum conditions for different operating ones. Because of the fluctuating nature of wind, that causes frequent change in the generator output frequency, it is necessary to link it with the load by static converters. The use of these devices of power electronics gives rise to problems related to the disturbances or harmonics distortions of the load. Pollution harmonics observed at the output have been reduced by using a passive filter making it possible to obtain a THD<5%, within the international standards, in order to ensure a good quality of electrical energy supplied to the load.

A photovoltaic conversion system with storage by supercapacitors is modeled. The analysis of the energetic and temporal efficiencies on cycle enabled us to determine the triggering thresholds of the charge/discharge which allow the optimal transfer between the source and the load with an energetic efficiency of 93%.

Thereafter, these two fine models could be applied for other calculations of optimization or on energy hybrid systems of production or storage.

### **Keywords**

Wind turbine, Permanent magnet synchronous generator (PMSG), Modeling, Photovoltaic, Supercapacitor, Storage, Energy efficiency.

## Résumé

La mise en œuvre des énergies renouvelables nécessite une connaissance des moyens de production et de conversion de l'énergie. Dans ce contexte, deux systèmes de conversion d'énergie intermittente (éolienne-photovoltaïque) sont modélisés avec des lois de comportement fines.

La modélisation d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) est présentée. L'utilisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents rend les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes à cause de la possibilité d'extraction optimale de l'énergie dans les différentes conditions de fonctionnement. A cause de la nature fluctuante du vent qui provoque une variation fréquente de la fréquence à la sortie du GSAP, il est nécessaire de lier ce dernier avec la charge par des convertisseurs statiques. L'utilisation de ces dispositifs d'électronique de puissance engendre des problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques de la charge. La pollution harmonique constatée en sortie a été réduite grâce à un filtre passif permettant d'obtenir un THD  $< 5\%$ , donc dans les normes internationales, assurant ainsi une bonne qualité d'énergie électrique fournie à la charge.

Un système de conversion photovoltaïque avec un stockage par supercondensateurs est modélisé. L'analyse des rendements énergétique et temporel sur cycle a permis de déterminer les seuils de déclenchement de la charge/décharge permettant le transfert optimal entre la source et la charge avec un rendement énergétique de 93%.

Par la suite, ces deux modèles fins pourront être mis en application pour d'autres calculs d'optimisation ou pour des systèmes hybrides de production ou de stockage d'énergie.

### Mots-clés

Eolienne, Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), Modélisation, Photovoltaïque, Supercondensateur, Stockage, Rendement énergétique.

# DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes grands parents*

*A mes parents*

*A mes sœurs*

*A tous mes Amis*

# REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein du département d'Électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénierat, Université Badji Mokhtar-Annaba et en collaboration avec le Centre d'Étude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES), Université Paris-Est, Créteil (France).

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à Madame Soltani Fatma, Maitre de Conférences à l'Université Badji Mokhtar- Annaba, pour son encadrement, ainsi qu'à Monsieur Logerais Pierre-Olivier, Maitre de Conférences à l'Université de Paris-Est Créteil France, pour son Co-encadrement et les conseils avisés qu'il a su me prodiguer tout au long de ma thèse.

Je tiens à remercier Monsieur Omeiri Amar, Professeur à l'Université Badji Mokhtar-Annaba, pour m'avoir dirigé et qui n'a jamais manqué de me conseiller et de m'orienter tout au long de ces années de travail.

Je remercie Monsieur Ouari Ahmed, Professeur à l'Université Badji Mokhtar-Annaba, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Messieurs, Labar Hocine, Professeur à l'Université Badji Mokhtar-Annaba, Saad Salah, Professeur à l'Université Badji Mokhtar- Annaba, Lemzadmi Ahcene, Maitre de Conférences à l'Université de Guelma, pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Jean-Félix Durastanti, Professeur des Universités en énergétique au Centre d'Étude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES) de l'Université Paris-Est Créteil (France) et toute l'équipe de recherche de m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Mes remerciements à Monsieur Chebira Abdennasser, Maitre de conférences à l'Université de Paris-Est Créteil France.

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1.1</b> Avantages et inconvénients de chaque énergie renouvelable.....	7
<b>Tableau 1.2</b> Durée d'ensoleillement et énergie reçue par régions.....	10
<b>Tableau 1.3</b> Classification des turbines éoliennes.....	18
<b>Tableau 3.1</b> Paramètre de la génératrice GSAP à vide.....	75
<b>Tableau 3.2</b> Paramètre de la génératrice GSAP en charge.....	78
<b>Tableau 4.1</b> Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.....	87
<b>Tableau 4.2</b> Niveau de compatibilité (norme CEI 61000-2-2).....	91
<b>Tableau 4.3</b> Limite des composantes harmoniques (norme CEI 61000-3-2).....	91
<b>Tableau 4.4</b> Limite IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.....	92
<b>Tableau 4.5</b> Limite IEEE des émissions de courants harmoniques.....	92
<b>Tableau 4.6</b> Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.....	93
<b>Tableau 4.7</b> Paramètres de simulations.....	116
<b>Tableau 5.1</b> Caractéristiques du modèle.....	126

## Liste des figures

### Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> Energie solaire.....	8
<b>Figure 1.2</b> Energie éolienne.....	9
<b>Figure 1.3</b> Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juin).....	10
<b>Figure 1.4</b> Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie.....	11
<b>Figure 1.5</b> Unités de production photovoltaïque.....	12
<b>Figure 1.6</b> Composantes du rayonnement solaire au sol.....	13
<b>Figure 1.7</b> Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en KWh/m <sup>2</sup> /jour.....	14
<b>Figure 1.8</b> L'angle d'incidence maximal.....	16
<b>Figure 1.9</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	17
<b>Figure 1.10</b> Types des turbines éoliennes.....	17
<b>Figure 1.11</b> Eléments constituant une éolienne.....	19
<b>Figure 1.12</b> Schéma de principe de la batterie.....	21
<b>Figure 1.13</b> Schéma de principe des supercondensateurs.....	22
<b>Figure 1.14</b> Schéma de principe de la pile à combustible.....	22
<b>Figure 1.15</b> Vision futuriste du réseau électrique.....	24

### Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b> Colonne d'air.....	26
<b>Figure 2.2</b> Tube de courant autour d'une éolienne.....	27
<b>Figure 2.3</b> Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage ( $\Omega_t R_t$ ).....	28
<b>Figure 2.4</b> Allures des coefficients $C_p$ et $C_m$ en fonction du $\lambda$ et $\beta$ .....	31
<b>Figure 2.5</b> Coefficients de puissance de diverses éoliennes.....	31
<b>Figure 2.6</b> Influence du nombre de pales sur le rendement.....	32
<b>Figure 2.7</b> Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	33
<b>Figure 2.8</b> Bilan des forces sur une pale.....	33
<b>Figure 2.9</b> Flux d'air sur un profil de pale " <b>stall</b> ".....	34
<b>Figure 2.10</b> Variation de l'angle de calage $\beta$ d'une pale.....	35
<b>Figure 2.11</b> Influence de l'angle d'orientation $\beta$ sur le coefficient de puissance.....	35
<b>Figure 2.12</b> Courbe de production typique d'un aérogénérateur.....	36
<b>Figure 2.13</b> Système éolien.....	37
<b>Figure 2.14</b> Modèle simplifié de la turbine éolienne.....	39
<b>Figure 2.15</b> Chaîne de production d'énergie éolienne.....	39
<b>Figure 2.16</b> Spectre d'énergie des mouvements atmosphériques.....	40
<b>Figure 2.17</b> Profil du vent sans filtrage.....	42
<b>Figure 2.18</b> Profil du vent avec filtrage.....	43
<b>Figure 2.19</b> Schéma de la turbine éolienne.....	43
<b>Figure 2.20</b> Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine.....	45
<b>Figure 2.21</b> Puissance éolienne extraite en fonction de la vitesse de rotation.....	46



<b>Figure 2.22</b>	Caractéristique couple/vitesse d’une machine asynchrone.....	49
<b>Figure 2.23</b>	Connexion directe d’une machine asynchrone sur le réseau.....	49
<b>Figure 2.24</b>	Eolienne connectée au réseau par l’intermédiaire d’une interface.....	50
<b>Figure 2.25</b>	Schéma de la connexion de l’éolienne avec la MAS à double stator.....	51
<b>Figure 2.26</b>	Schéma de principe d’une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	52
<b>Figure 2.27</b>	MADA - structure Kramer.....	53
<b>Figure 2.28</b>	MADA avec contrôle du glissement par l’énergie dissipée.....	54
<b>Figure 2.29</b>	Effet de la variation de la résistance rotorique sur le $C_{em}$ .....	54
<b>Figure 2.30</b>	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	55
<b>Figure 2.31</b>	Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	55
<b>Figure 2.32</b>	Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.....	57
<b>Figure 2.33</b>	Systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimants permanents.....	58
<b>Figure 2.34</b>	Système éolien à coût minimum basé sur la GSAP.....	59

### Chapitre 3

<b>Figure 3.1</b>	Classification des machines synchrones.....	62
<b>Figure 3.2</b>	Rotor à pôles saillants.....	63
<b>Figure 3.3</b>	Rotor à pôles lisses.....	63
<b>Figure 3.4</b>	Illustration d’une courbe $B-H$ les aimants.....	64
<b>Figure 3.5</b>	Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.....	65
<b>Figure 3.6</b>	Quelques configurations du placement des aimants.....	66
<b>Figure 3.7</b>	MSAP à flux radial.....	66
<b>Figure 3.8</b>	Machines à flux radial (a) et axial (b).....	67
<b>Figure 3.9</b>	Machine synchrone à flux axial.....	67
<b>Figure 3.10</b>	Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	70
<b>Figure 3.11</b>	Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.....	70
<b>Figure 3.12</b>	Circuit équivalent de MSAP (convention moteur).....	72
<b>Figure 3.13</b>	Modèle de PARK pour la génératrice (GSAP).....	72
<b>Figure 3.14</b>	Simulation de la GSAP à vide.....	75
<b>Figure 3.15</b>	Simulation de la GSAP sur une charge.....	78

### Chapitre 4

<b>Figure 4.1</b>	Creux et coupures de tension.....	82
<b>Figure 4.2</b>	Fluctuations de tension.....	82
<b>Figure 4.3</b>	Déséquilibre du système triphasé de tension.....	83
<b>Figure 4.4</b>	Variation de fréquence.....	83
<b>Figure 4.5</b>	Les harmoniques.....	84
<b>Figure 4.6</b>	Représentation d’un harmonique.....	86
<b>Figure 4.7</b>	Filtre passif.....	94
<b>Figure 4.8</b>	Configuration du filtre hybride de puissance.....	95
<b>Figure 4.9</b>	Chaine de conversion d’énergie éolienne connectée avec la charge.....	96
<b>Figure 4.10</b>	Système étudié en détails.....	97
<b>Figure 4.11</b>	Représentation du redresseur triphasé à diode.....	97

<b>Figure 4.12</b> Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale.....	98
<b>Figure 4.13</b> Tensions de phases et tension redressée.....	99
<b>Figure 4.14</b> Courants de phases en amont du pont de diodes.....	99
<b>Figure 4.15</b> Courant redressé $I_{dc}$ en aval du pont de diode.....	100
<b>Figure 4.16</b> Tension redressée avec phénomène d'empiètement.....	100
<b>Figure 4.17</b> Schéma électrique du bus continu.....	101
<b>Figure 4.18</b> Effet de la capacité de filtrage sur la tension de sortie.....	101
<b>Figure 4.19</b> Représentation de l'onduleur de tension.....	102
<b>Figure 4.20</b> Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.....	104
<b>Figure 4.21</b> Circuit équivalent d'un filtre LC.....	106
<b>Figure 4.22</b> Schéma équivalent de l'impédance de la charge.....	109
<b>Figure 4.23</b> Modèle Simulink de la chaîne de conversion d'énergie éolienne.....	110
<b>Figure 4.24</b> Couple électromagnétique.....	111
<b>Figure 4.25</b> Vitesse de rotation du GSAP.....	111
<b>Figure 4.26</b> Courant simple de la GSAP (phase A).....	112
<b>Figure 4.27</b> Tension simple de la GSAP (phase A).....	112
<b>Figure 4.28</b> Tension en sortie du redresseur.....	113
<b>Figure 4.29</b> Courant simple à la sortie de l'onduleur.....	113
<b>Figure 4.30</b> Tension simple à la sortie de l'onduleur.....	113
<b>Figure 4.31</b> Spectre harmonique de tension avant filtrage.....	114
<b>Figure 4.32</b> Courant simple fourni à la charge.....	114
<b>Figure 4.33</b> Tension simple fournie à la charge.....	115
<b>Figure 4.34</b> Spectre harmonique de tension après filtrage.....	115

## Chapitre 5

<b>Figure 5.1</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	118
<b>Figure 5.2</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	119
<b>Figure 5.3</b> Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.....	120
<b>Figure 5.4</b> Éléments de la chaîne de conversion de l'énergie solaire.....	123
<b>Figure 5.5</b> Circuit équivalent du système de stockage de l'énergie photovoltaïque.....	124
<b>Figure 5.6</b> Structure d'un supercondensateur.....	125
<b>Figure 5.7</b> Exemple d'évolution de la tension de supercondensateurs charge/décharge...	127
<b>Figure 5.8</b> Modèle Simulink avec un intégrateur pour calculer le transfert énergétique...	128
<b>Figure 5.9</b> Exemple de l'énergie mise en jeu lors d'un cycle de charge/décharge.....	129
<b>Figure 5.10</b> Énergies nécessaires pour la charge.....	131
<b>Figure 5.11</b> Rendements énergétiques sur cycle.....	131
<b>Figure 5.12</b> Durées de charge/décharge.....	132
<b>Figure 5.13</b> Rapports des cycles temporels.....	133
<b>Figure 5.14</b> Echange d'énergie lors de cycles successifs pendant une heure.....	134
<b>Figure 5.15</b> Échanges d'énergie pour des cycles successifs pendant une heure.....	135
<b>Figure 5.16</b> Détermination du minimum de perte.....	135

Liste des symboles

$\vec{F}$	Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable
$V_1, V_2$	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne (m.s <sup>-1</sup> )
$\rho$	Masse volumique de l'air (en kg.m <sup>-3</sup> )
$E$	Energie cinétique en joules
$S$	Surface balayée par le rotor de l'éolienne (m <sup>2</sup> )
$P_m$	Puissance extraite par le rotor éolien
$P_{mt}$	Puissance théorique maximale extractible du vent
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$\beta$	L'angle d'orientation des pales
$\lambda$ , TSR	Vitesse spécifique ou rapport de vitesse, (Tip-Speed-Ratio)
$\Omega_1, \Omega_2$	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
$P_{mg}$	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice
PPM	Point de puissance maximale
$\vec{v}$	Vecteur vitesse du vent
$\theta$	Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal
$i$	Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal
$\vec{v}_{rot}$	Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine
$\vec{v}_{res}$	Résultante des vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{v}_{rot}$
$\vec{F}_{ax}$	Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale
$\vec{F}_{rot}$	Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale
$\vec{F}_{res}$	Résultante de $\vec{F}_{ax}$ et $\vec{F}_{rot}$
$C_{aer}$	Couple aérodynamique de l'éolienne (N.m)
$R$	Rayon de la pale (m)
$\Omega_{turbine}$	Vitesse angulaire de la turbine
$C_g$	Couple résistant (N.m)
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique de la génératrice
$T_{bj}$	Force de poussée appliquée à la pale $j$ , avec $J \in \{1,2,3\}$
$\dot{\beta}_j$	Vitesse d'orientation de la pale, avec $J \in \{1,2,3\}$
$J_{pale}$	Inertie de la pale (kg.m <sup>2</sup> )
$db$	Coefficient de frottement de la pale par rapport à l'air
$Kb$	Elasticité de la pale
$f_{pale}$	Coefficient de frottement de la pale par rapport au support de l'éolienne
$J_h$	Inertie de l'arbre
$K_h$	Elasticité de l'arbre
$Dh$	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
$G$	Gain du multiplicateur
$dg$	Coefficient de frottement
$C_g$	Couple d'entraînement de la génératrice (N.m)
$C_{mec}$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne (N.m)
MS	Machine synchrone
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
$\vec{\beta}$	Champ d'induction magnétique (T)
$\xi$	Rapport de saillance

$f.e.m$	Force électromotrice
$GSAP$	Génératrice synchrone à aimants permanents
$(d, q)$	Indice du repère de Park lié au rotor
$R_s$	Résistance statorique
$L_d$	Inductance statorique directe
$(v_{sd}, v_{sq})$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
$L_q$	Inductance statorique quadratique
$\varphi_f$	Flux d'excitation des aimants permanents
$(\varphi_{sd}, \varphi_{sq})$	Composantes du flux statorique dans le repère de Park
$(I_{sd}, I_{sq})$	Composantes du courant statorique
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant (N.m)
$P$	Nombre de paire de pôles
$J$	Moment d'inertie totale de la machine
$f$	Coefficient de frottement visqueux
$\omega$	Pulsation électrique statorique
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique du rotor
$AC/DC$	Alternatif / Continu
$DC/AC$	Continu / Alternatif
$IGBT$	Insulated Gate Bipolar Transistor
$D_i$	Diodes
$MLI$	Modulation de largeur d'impulsions
$V_{dc}$	Tension redressé (V)
$I_{dc}$	Courant redressé (A)
$m$	Indice de modulante
$f_p$	Fréquence de porteuse (Hz)
$f_m$	Fréquence de modulante (Hz)
$IEEE$	Institute of Electrical and Electronics Engineers
$CEI$	Commission Electrotechnique Internationale
$THD$	Taux de Distorsion Harmonique (%)
$h$	Rang d'harmonique
$I_h$	Valeur efficace du courant harmonique du rang $h$ (A)
$\varphi_h$	Déphasage de l'harmonique $h$
$I_1$	Valeur efficace du courant fondamental (A)
$\varphi_1$	Déphasage du courant fondamental (rad)
$F_p$	Facteur de puissance
$L_f$	Inductance du filtre (H)
$C_f$	Capacité du filtre (F)
$R_{ch}$	Résistance de la charge ( $\Omega$ )
$L_{ch}$	Inductance de la charge (H)
$MPPT$	Point de puissance maximale
$a$	Facteur d'idéalité de la diode
$C$	Capacité de la ligne de transmission (F)
$C_2$	Capacité de la première branche complémentaire (F)
$C_3$	Capacité de la seconde branche complémentaire (F)
$E$	Énergie (J)
$G$	Éclairement solaire global ( $W.m^{-2}$ )
$I$	Courant électrique (A)
$I_0$	Courant de saturation de la diode (A)
$I_d$	Courant de la diode (A)

$I_{pv}$	Courant photo généré (A)
$I_{sc}$	Courant de court-circuit (A)
$K_I$	Coefficient de température pour l'intensité en court-circuit ( $A.K^{-1}$ )
$K_V$	Coefficient de température pour la tension en circuit ouvert ( $V.K^{-1}$ )
$N$	Nombre de cycles de charge/décharge en une heure
$N_S$	Nombre de cellules connectées en série
$R$	Résistance de la ligne de transmission ( $\Omega$ )
$R_a$	Résistance d'accès ( $\Omega$ )
$R_p$	Résistance shunt ou parallèle ( $\Omega$ )
$R_s$	Résistance série ( $\Omega$ )
$R_2$	Résistance de la première branche complémentaire ( $\Omega$ )
$R_3$	Résistance de la seconde branche complémentaire ( $\Omega$ )
$t$	Temps (s)
$T$	Température de jonction (K)
$V$	Tension électrique (V)
$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert (V)
$V_t$	Potentiel thermique (V)

*Symboles grecs*

$\eta$	Rendement (%)
--------	---------------

*Index*

ch.	Charge
disch.	Décharge
e	Énergie
n	Nominal
t	Temps

*Constantes*

$k = 1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$	Constante de Boltzmann
$q = 1.60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$	Charge de l'électron

## *Table Des Matières*

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
 <i>Chapitre 1 :</i> <i>Etat de l'art sur les Energies Renouvelables</i>	
1.1 Introduction .....	4
1.2 Les énergies renouvelables .....	4
1.2.1 L'énergie hydraulique .....	5
1.2.2 L'énergie de la biomasse .....	5
1.2.3 L'énergie géothermique .....	5
1.2.4 L'énergie solaire .....	6
1.2.5 L'énergie éolienne .....	6
1.3 Développement des énergies renouvelables en Algérie .....	7
1.3.1 L'énergie solaire .....	8
1.3.2 L'énergie éolienne .....	9
1.4 Evaluation des ressources renouvelables en Algérie .....	9
1.4.1 Potentiel solaire en Algérie .....	9
1.4.2 Potentiel éolien en Algérie .....	10
1.5 Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....	11
1.5.1 Définition de l'énergie photovoltaïque .....	11
1.5.2 Rayonnement solaire .....	12
1.5.2.1 Phénomène de diffusion .....	13
1.5.2.2 Phénomène d'absorption .....	13
1.5.3 Cellule photovoltaïque .....	14
1.5.4 Angle d'inclinaison du panneau solaire (photovoltaïque) .....	16
1.6 Généralités sur les systèmes éoliens .....	16
1.6.1 Définition de l'énergie éolienne .....	16
1.6.2 Les types des turbines éoliennes .....	17
1.6.2.1 Eolienne à axe vertical .....	17
1.6.2.2 Eolienne à axe horizontal .....	18
1.6.3 Classification des turbines éoliennes .....	18
1.6.4 Les principaux composants d'une éolienne .....	18

1.7 Type de systèmes.....	20
1.7.1 Système autonomes .....	20
1.7.2 Système connectées au réseau .....	20
1.8 Description des différents types de stockage.....	20
1.8.1 Les batteries .....	20
1.8.2 Les supercondensateurs .....	21
1.8.3 Les piles à combustibles .....	22
1.8.4 Les volants d'inertie .....	23
1.9 Futur énergétique.....	23
1.10 Conclusion et Problématique.....	24

## **Chapitre 2 :**

### ***Modélisation et simulation de la turbine éolienne***

2.1 Introduction .....	26
2.2 Conversion de l'énergie éolienne .....	26
2.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	26
2.2.2 Loi de Betz.....	27
2.2.3 Le ratio de vitesse (tip-speed ratio) .....	28
2.2.4 Coefficient de puissance .....	29
2.2.5 Coefficient de couple (torque coefficient).....	29
2.2.6 Caractéristiques des turbines éoliennes .....	30
2.2.7 Nombre de pales .....	31
2.2.8 Production d'énergie mécanique .....	32
2.2.9 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne .....	33
2.2.9.1 Bilan des forces sur une pale .....	33
2.2.9.2 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne .....	34
2.2.9.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne .....	36
2.3 Modélisation d'une turbine éolienne .....	37
2.3.1 Introduction.....	37
2.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	38
2.3.3 Modèle de la chaîne de production d'énergie éolienne .....	39
2.3.4 Modèle du vent (Source primaire).....	40
2.3.4.1 Expression du vent en un point fixe.....	41
2.3.4.2 Le filtre spatial .....	41

2.3.5 Modélisation de la turbine .....	43
2.3.6 Modèle du multiplicateur.....	45
2.3.7 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	46
2.4 Mode d'exploitation de l'énergie éolienne .....	47
2.5 Générateurs utilisés dans la production éolienne .....	48
2.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	48
2.5.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	48
2.5.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator .....	51
2.5.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné" ....	52
2.5.1.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless" .....	55
2.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone .....	56
2.5.2.1 Générateur synchrone à rotor bobiné.....	56
2.5.2.2 Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP).....	57
2.6 Conclusion.....	59

### **Chapitre 3 :**

#### ***Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)***

3.1 Introduction .....	61
3.2 Généralités sur les machines synchrones.....	61
3.2.1 Présentation de la MSAP .....	61
3.2.2 Principe de fonctionnement de la machine synchrone .....	61
3.2.3 Classement des machines synchrones .....	62
3.3 Constitution de la machine synchrone.....	62
3.4 Machine synchrone à aimants permanents .....	63
3.4.1 Principaux matériaux utilisés dans les machines électriques.....	64
3.4.2 Aimants permanents .....	64
3.4.3 Matériaux pour aimants .....	65
3.4.4 Emplacement des aimants.....	65
3.4.5 Différentes types de machines synchrones à aimants.....	66
3.4.5.1 Machines synchrones à flux radial.....	66
3.4.5.2 Machines synchrones à flux axial .....	67
3.4.5.3 Machines synchrones à flux transverse.....	68
3.5 Avantages et inconvénients de la MSAP.....	68
3.5.1 Avantages de la MSAP.....	68



3.5.2 Inconvénients de la MSAP .....	68
3.6 Les domaines d’application de la MSAP .....	69
3.7 Modèle de la MSAP .....	69
3.7.1 Equations électriques de la machine.....	69
3.7.2 Equations magnétiques .....	71
3.7.3 Equations du couple électromagnétique .....	72
3.7.4 Equations mécaniques .....	73
3.8 Mode de fonctionnement .....	74
3.8.1 Fonctionnement à vide du GSAP .....	74
3.8.2 Fonctionnement en charge du GSAP.....	75
3.8.2.1 Equations d’état .....	76
3.8.2.2 Résultats de simulation de la GSAP en charge.....	77
3.9 Conclusion .....	79

### ***Chapitre 4 :***

#### ***Qualité de l’énergie électrique fournie par un système éolien***

4.1 Introduction .....	80
4.2 Paramètre de la qualité de l’énergie produite .....	80
4.2.1 Creux et coupures de tension.....	81
4.2.2 Fluctuation de tension.....	82
4.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension .....	82
4.2.4 Variation de fréquence.....	83
4.2.5 Harmoniques et interharmoniques .....	84
4.3 Définition des harmoniques.....	84
4.4 Interprétation des harmoniques .....	85
4.5 Sources des harmoniques et leurs effets .....	86
4.5.1 Sources des harmoniques.....	86
4.5.2 Effets des harmoniques.....	87
4.6 Mesures et prévention des harmoniques.....	88
4.6.1 Mesures des harmoniques.....	88
4.6.2 Facteur de puissance .....	89
4.6.3 Normes de la qualité d’énergie électrique .....	90
4.7 Solution pour diminuer la pollution harmonique .....	93
4.7.1 Filtrage passif.....	94

4.7.2 Filtrage actif.....	94
4.8 Intégration d'un système éolien avec la charge.....	95
4.8.1 Etude de connexion.....	96
4.8.1.1 Description du système.....	96
4.8.2 Modélisation des éléments de connexion avec la charge.....	97
4.8.2.1 Modélisation du redresseur triphasé à diode.....	97
4.8.2.2 Modélisation du bus continu.....	101
4.8.2.3 Modélisation de l'onduleur (MLI).....	102
4.8.2.4 Modélisation du filtre LC.....	105
4.9 Résultats de simulation.....	110
4.9.1 Avant filtrage.....	113
4.9.2 Après filtrage.....	114
4.10 Conclusion.....	116

### **Chapitre 5 :**

#### ***Transfert énergétique dans un système photovoltaïque-supercondensateurs***

5.1 Introduction.....	117
5.2 Système photovoltaïque.....	117
5.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque.....	118
5.2.2 Modèle de cellule photovoltaïque.....	119
5.2.3 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.....	119
5.2.4 Intégration des supercondensateurs dans les systèmes hybrides.....	121
5.2.5 Asymétrie charge/décharge.....	121
5.3 Modélisation de la chaîne de conversion.....	122
5.3.1 Chaîne de conversion.....	122
5.3.2 Eléments de la chaîne.....	123
5.3.2.1 Circuit équivalent.....	123
5.3.2.2 Dimensionnement.....	126
5.3.2.3 Simulations.....	126
5.3.3 Contrôle des cycles de charge/décharge.....	127
5.4 Exploitation.....	128
5.4.1 Durée de cycle.....	128
5.4.2 Rendement sur cycle énergétique.....	130
5.4.3 Rendement sur cycle temporel.....	131

5.4.4 Seuils optimaux de déclenchement.....	133
5.5 Conclusion.....	136
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>137</b>
<b>Références.....</b>	<b>140</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>150</b>



# ***Introduction générale***

## **Introduction générale**

L'électricité, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), qui sont à la fois des ressources épuisables et polluantes [1]. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont propres et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Les filières étudiées dans cette thèse sont l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque.

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent.

L'utilisation d'un système de production (photovoltaïque-éolien) est de plus en plus utilisé dans diverses applications en sites isolés pour l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes.

Les énergies photovoltaïques et éoliennes ont pour défaut de dépendre des conditions météorologiques, souvent très variables et difficiles à prévoir avec précision. Pour obtenir malgré cela une production la plus régulière possible, une solution consiste à utiliser dans un système de production d'énergie plusieurs types de sources d'énergies renouvelables.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu, la durée de l'ensoleillement dépassant les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoins en énergie solaire.

Ainsi le développement de la production électrique d'origine éolienne en Algérie représente une valeur d'investissement sûre en matière de sauvegarde de l'environnement et d'économie d'énergie. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie électrique fournie.

La production de l'électricité est donc forcément, malgré une apparence anodine, synonyme de perturbations. L'utilisation excessive d'un mode de production accentue fortement l'effet nuisible qui lui est associé et il apparaît évident que la diversification des sources est une solution à promouvoir. L'utilisation de sources d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources. L'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée : les applications stationnaires connectées ou non au réseau, en particulier les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source renouvelable. Le rôle d'un système (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

Les systèmes de production d'énergie doivent réaliser deux objectifs : premièrement, assurer l'autonomie énergétique du site, par la maximisation de la puissance récupérée par les sources, et deuxièmement, la rentabilité économique et écologique, en récupérant certes le

plus possible d'énergie à un moment donné, mais aussi en maximisant la durée de vie des composants du système.

Dans ce travail nous définirons en détails le système à étudier et les solutions à mettre en œuvre, afin de remplir les objectifs de maximisation de la production, la qualité de l'énergie fournie et la durée de vie du système éolien, puis celui photovoltaïque en considérant un stockage par supercondensateurs.

Pour atteindre ces objectifs, la thèse comprend cinq chapitres :

- Le premier chapitre expose les différentes sources d'énergies renouvelables existantes; nous focalisons notre attention sur la production d'électricité éolienne et photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'aux principes généraux et aux différents types des machines synchrones à aimants permanents (MSAP).
- Le troisième chapitre présente la modélisation et simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).
- Le quatrième chapitre traite l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique fournie par un système éolien à la charge.
- Le dernier chapitre, une méthode d'optimisation du transfert d'énergie entre les panneaux solaire photovoltaïque et les supercondensateurs est développée.

Enfin, une synthèse des travaux réalisés et des perspectives de recherche concluront cette thèse.

# *Chapitre 1*

*Etat de l'Art sur les  
Energies Renouvelables*



## **1.1 Introduction**

La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles (nucléaire). Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. La production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accidents liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de consommation).

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'années au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa santé que pour les installations électriques [1].

La pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certains pays, se sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite « **Renouvelable** ».

## **1.2 Les énergies renouvelables**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies

renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins [1,2]. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

### **1.2.1 L'énergie hydraulique**

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique.

### **1.2.2 L'énergie de la biomasse**

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...). En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1% de la production d'électricité mondiale [3].

### **1.2.3 L'énergie géothermique**

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- **La géothermie à haute énergie** : ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [3,4].
- **La géothermie de basse énergie** : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- **La géothermie de très basse énergie** : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux des températures comprises entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement

par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie.

#### **1.2.4 L'énergie solaire**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [5].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique** : qui consiste à produire de la chaleur grâce à des miroirs concentrateurs. On peut aussi générer de la vapeur qui en se détendant dans une turbine permettra la production d'électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de cellules solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels les hydrocarbures ou le charbon.
- **L'énergie solaire passive**: est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à capter directement la lumière pour réchauffer un fluide caloporteur.

#### **1.2.5 L'énergie éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [6]. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 [3,7]. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

**Tableau 1.1** Avantages et inconvénients de chaque énergie renouvelable

Les énergies	Les Avantages	Les Inconvénients
L'énergie Solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une bonne source d'énergie renouvelable.</li> <li>- Une énergie non-polluante.</li> <li>- La lumière ne coûte rien.</li> <li>- Peut de soutien et dure longtemps.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il n'y a pas de lumière la nuit.</li> <li>- A besoin de beaucoup d'espace.</li> <li>- Le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux.</li> <li>- Panneau fragile.</li> </ul>
L'énergie Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une énergie naturelle non-polluante.</li> <li>- Retenues d'eau possible dans différents endroits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une perturbation de l'équilibre écologique.</li> <li>- Grands barrages coûteux.</li> </ul>
L'énergie Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il y a toujours du vent dans un même endroit, donc jour et nuit.</li> <li>- Tout le mécanisme est dans l'éolienne donc pas de grandes usines.</li> <li>- Une énergie renouvelable donc non-polluante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un impact visuel.</li> <li>- Le prix couteux.</li> <li>- La migration des oiseaux.</li> </ul>
L'énergie Géothermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pollution non- toxique.</li> <li>- Beaucoup d'énergie pour peu de place.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Répartitions des sources.</li> <li>- Installation coûteuse.</li> </ul>

### 1.3 Développement des énergies renouvelables en Algérie

Le potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays.

Cependant, l'État algérien commence à adopter des solutions économiques et écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE), l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 par contre aujourd'hui en 2015, la puissance installée d'origine renouvelable est de l'ordre de 650 MW.

### 1.3.1 Énergie solaire

Le 9 décembre 2011, la société algérienne de l'électricité et du gaz **Sonelgaz** et **Desertec Industry Initiative** ont signé à Bruxelles un accord de coopération visant au renforcement des échanges d'expertises techniques, à l'examen des voies et moyens pour l'accès aux marchés extérieurs et à la promotion commune du développement des énergies renouvelables en Algérie et à l'international.

Pour que l'Algérie préserve les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire. Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a chargé la **Sonelgaz** de construire la centrale électrique mixte de Hassi R'Mel, mise en service en 2011 à Tilghemt dans la wilaya de laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire thermodynamique + 120 MW gaz). C'est la société **New Energy Algeria** (NEA), qui est chargée du secteur des énergies nouvelles et renouvelables.

La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires est opérationnelle à partir du mois de mars 2012 avec un taux d'intégration nationale de 90 %.



**Figure 1.1** Energie solaire

### 1.3.2 Énergie éolienne

Un autre domaine des énergies renouvelables qui reste à développer et promouvoir en Algérie est celui de l'énergie éolienne. Un projet portant sur la réalisation d'une ferme éolienne à Adrar a été attribué au consortium algéro-français, **Cegelec**. Ainsi le fabricant français d'éoliennes **Vergnet** a remporté un appel d'offres international auprès de la **Compagnie d'Engineering de l'électricité et du gaz** (CEEG), une filiale du groupe Sonelgaz, concernant l'installation du premier parc éolien à Adrar au sud-ouest du pays. Ce complexe éolien aura une puissance de 10 MW et devait être mis en service courant 2012. Mais après plus d'une année et demie de retard pour le lancement de cette ferme éolienne, elle n'a été mise en service que le 03 juillet 2014, alors que d'autres projets programmés dans le plan du gouvernement sont en attente de concrétisation.



Figure 1.2 Energie éolienne

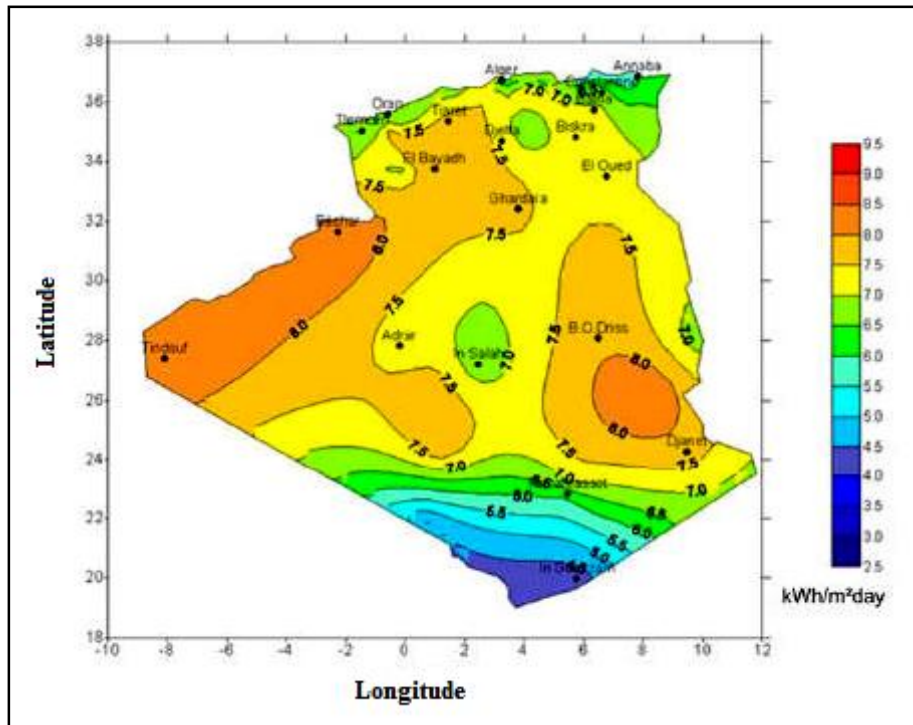
## 1.4 Evaluation des ressources renouvelables en Algérie

### 1.4.1 Potentiel solaire en Algérie

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. La figure 1.3 montre la carte de l'irradiation solaire en Algérie au mois de juin [8].

**Tableau 1.2** Durée d'ensoleillement et énergie reçue par région

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650



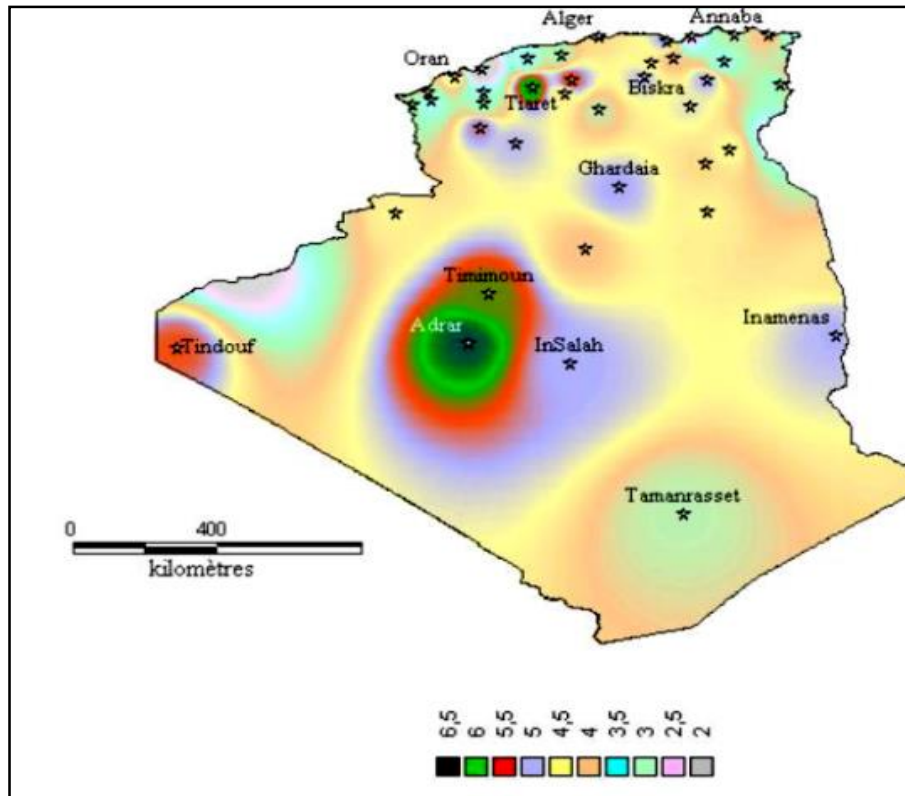
**Figure 1.3** Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juin)

### 1.4.2 Potentiel éolien en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'Atlas télien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers

d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud. La figure 1.4 représente la carte du vent en Algérie [8,9].



**Figure 1.4** Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Les filières étudiées dans ce travail sont celles de l'énergie **éolienne** et du solaire **photovoltaïque**.

## 1.5 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

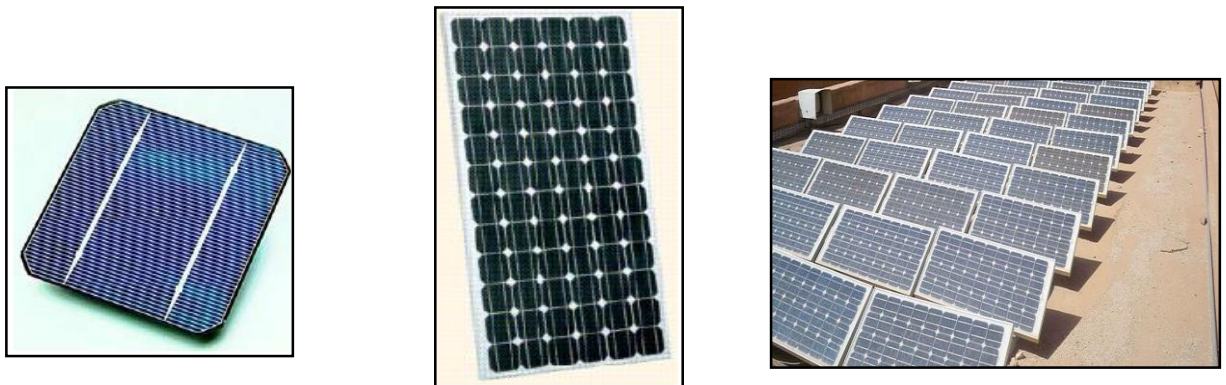
### 1.5.1 Définition de l'énergie photovoltaïque

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Le monde peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité.

L'**énergie solaire photovoltaïque** désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont connectées, le tout encapsulé constitue un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque forment un champ



photovoltaïque. Le terme « photovoltaïque » peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [10].



(a) Cellule photovoltaïque (Si monocristallin)      (b) Panneau photovoltaïque      (c) Champ photovoltaïque

**Figure 1.5** Unités de production photovoltaïque

### 1.5.2 Rayonnement solaire

Contrairement à la conduction et à la convection, le mode de transfert de chaleur par rayonnement ne nécessite pas la présence d'un support matériel solide ou fluide.

On réunit sous l'appellation de rayonnement électromagnétique l'ensemble des échanges peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de 0.2 à 0.4  $\mu\text{m}$  c'est-à-dire de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible, c'est la matière première de l'énergie solaire. Le rayonnement solaire reçu par une surface au sol dépend essentiellement de la période (condition météorologique), du lieu (altitude et latitude) et de l'environnement (condition atmosphérique).

L'Algérie est située entre les latitudes 20<sup>0</sup> et 37<sup>0</sup> dans l'hémisphère Nord. Elle reçoit le maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et le minimum lors du solstice d'hivers (21 ou 22 décembre).

L'atmosphère modifie de façon importante le rayonnement solaire par l'intermédiaire des mécanismes suivants :

- l'absorption de la lumière par divers gaz.
- diffusion par leurs molécules.
- absorption et diffusion par les aérosols et les poussières.

### 1.5.2.1 Phénomène de diffusion

Ce phénomène est dû aux particules et aux irrégularités de surfaces. La lumière est alors émise dans toutes les directions. L'atmosphère agit non seulement par les particules et aérosol mais aussi par les molécules d'air elles-mêmes.

### 1.5.2.2 Phénomène d'absorption

L'absorption est une atténuation du rayonnement lorsqu'il traverse un milieu matériel. L'ozone, la vapeur d'eau et le gaz carbonique sont les principaux éléments qui agissent dans l'absorption au niveau du sol, le rayonnement solaire se décompose en :

- Rayonnement solaire direct.
- Rayonnement solaire diffus.
- Rayonnement solaire réfléchi.

Le **rayonnement direct** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

Le **rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Les rayonnements direct et diffus donnent le rayonnement global. Le dernier rayonnement est pris en considération lorsqu'on a des modules bifocaux.

L'**albédo** est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

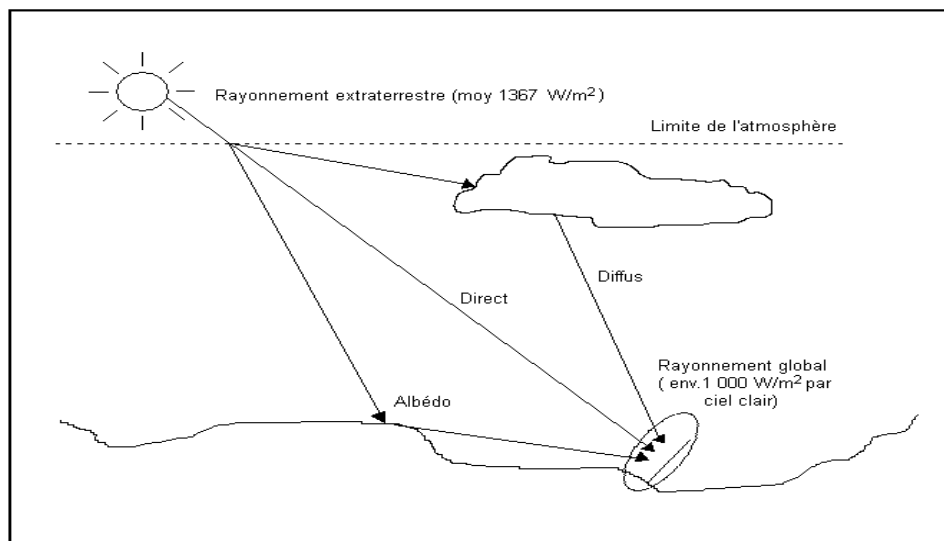
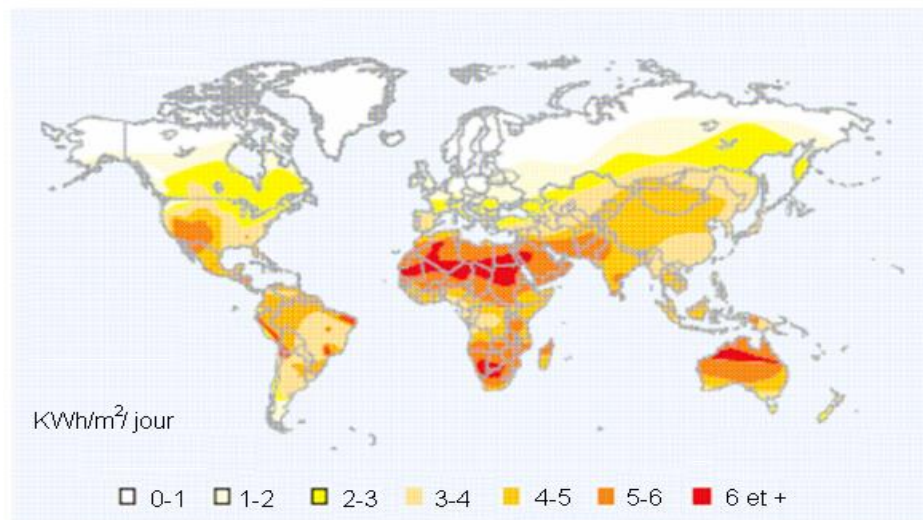


Figure 1.6 Composantes du rayonnement solaire au sol

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure 1.6 ci-dessus, cette figure représente les composantes du rayonnement solaire.

Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année comme illustré sur la figure 1.7.



**Figure 1.7** Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en KWh/m<sup>2</sup>/jour

### 1.5.3 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère une tension électrique (volt) (cet effet est appelé l'effet photovoltaïque). Le courant obtenu est un courant continu et la tension obtenue est de l'ordre de 0.5 V. Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Un autre nom est « photo-galvanique ». Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre et un encapsulant généralement de l'éthyle vinyl acétate (EVA) permet l'adhésion des différentes strates [8,10].

#### - Technologies de cellules

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. D'autres matériaux sont utilisés : tellure de cadmium, arséniure de gallium, di-sélénium de cuivre et d'indium (CIS). Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au

silicium et une durée de vie plus grande. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de dix ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. Les techniques de fabrication et les caractéristiques des principaux types de cellules sont les suivantes :

- **Cellule en silicium amorphe** : le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est de couleur grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres.

**Avantages :**

- Fonctionnement avec un éclairage faible.
- Moins chères que les autres.

**Inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%)
- Performances diminuent sensiblement avec le temps.

- **Cellule en silicium monocristallin** : lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

**Avantage :**

- Très bon rendement (17.2%)

**Inconvénients :**

- Coût élevé
- Rendement faible sous un faible éclairage

- **Cellule en silicium poly-cristallin** : pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellules est également bleu, mais pas uniforme. On distingue des motifs créés par les différents cristaux.

**Avantages :**

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

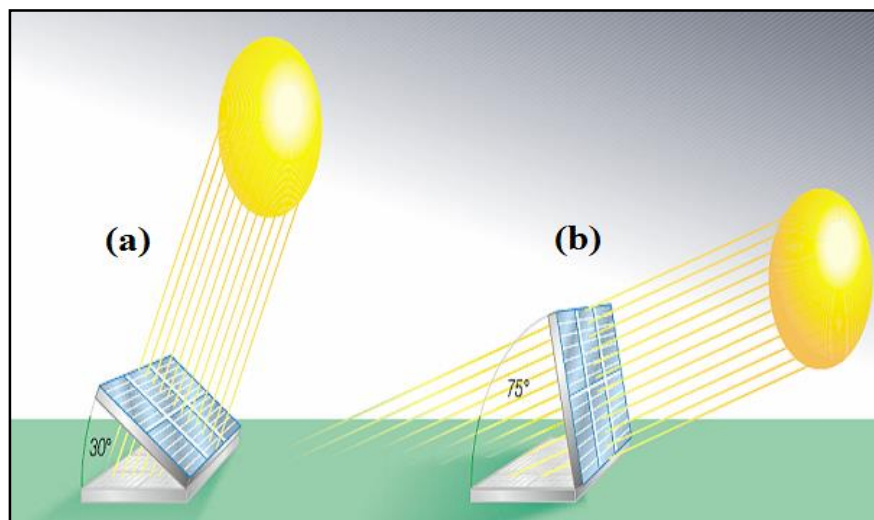
**Inconvénient :**

- Les mêmes que le monocristallin.

### 1.5.4 Angle d'inclinaison du panneau solaire (photovoltaïque)

Le rendement des centrales solaires dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels figure l'angle d'incidence des rayons du soleil. L'idéal serait que l'angle d'incidence des rayons du soleil, c'est-à-dire l'angle formé par le plan des panneaux solaires et ces rayons, soit toujours égal à  $90^\circ$ , car c'est ainsi que les panneaux reçoivent le plus de photons. Tel n'est malheureusement pas le cas.

D'abord, l'angle incident varie au fil de la journée : s'il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, heure du zénith, il diminue à nouveau jusqu'au couchant. Ensuite, il atteint rarement  $90^\circ$  à Berne, par exemple, l'angle incident maximal oscille entre  $15^\circ$  en hiver et  $60^\circ$  en été comme le montre dans la figure 1.8.



**Figure 1.8** L'angle d'incidence maximal

(a) en été ; (b) en hiver

## 1.6 Généralités sur les systèmes éoliens

### 1.6.1 Définition de l'énergie éolienne

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, soit cette énergie est utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage ou les anciens moulins à vent, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas, on parle d'aérogénérateurs [1,11].

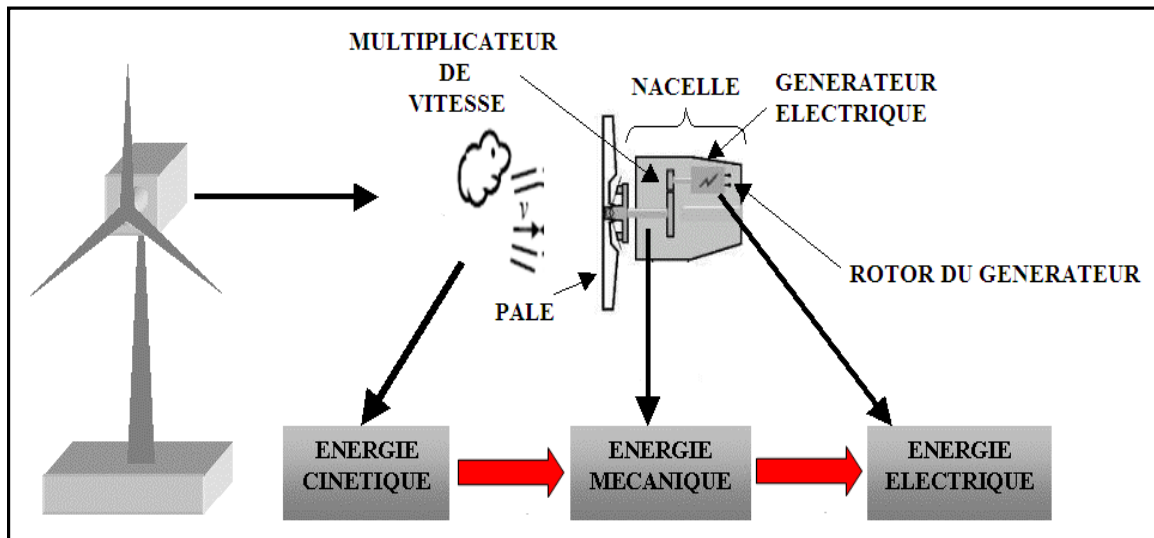
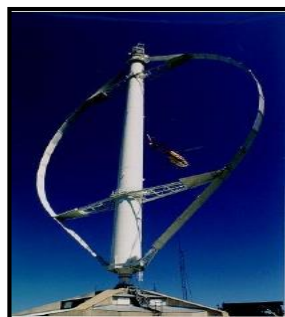


Figure 1.9 Conversion de l'énergie cinétique du vent [1]

### 1.6.2 Les types des turbines éoliennes

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :

- turbine à axe verticale (figure 1.10 a)
- turbine à axe horizontal (figure 1.10 b)



(a) Axe vertical



(b) Axe horizontal

Figure 1.10 Types des turbines éoliennes

#### 1.6.2.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite l'accessibilité de dépannage en cas de dysfonctionnement.

Néanmoins elles restent marginales et peu utilisées voir abandonnées actuellement à cause de leurs faible vitesse, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé au près du sol, et de la surface importante qu'elles occupent au sol [4].

### 1.6.2.2 Eoliennes à axe horizontal

Elles sont constituées de plusieurs pales à la manière des ailes d'avion pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3 pour la production d'électricité. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ces éoliennes sont plus utilisées comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.

### 1.6.3 Classification des turbines éoliennes

Le tableau 1.3 montre une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leurs hélices.

**Tableau 1.3** Classification des turbines éoliennes [2,7].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

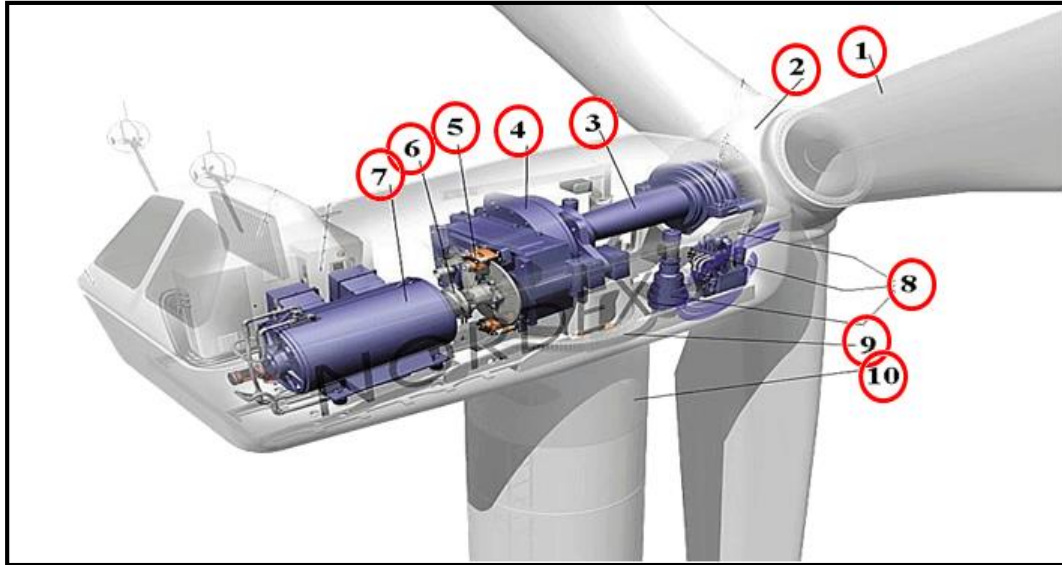
Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

### 1.6.4 Les principaux composants d'une éolienne

L'éolienne est constituée généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés par la figure 1.11 avec :

- (1) - pale , (2) – moyeu , (3) – arbre de transmission , (4) – multiplicateur , (5) – frein à disque , (6) – arbre rapide , (7) – génératrice , (8) – système de commande , (9) – système d'orientation , (10) – le mat ou la tour.



**Figure 1.11** Eléments constituant une éolienne [1].

- **Le mat ou la tour** : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat ou se trouve la nacelle.
- **La nacelle** : regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.
- **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- **Le système de refroidissement** : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisée pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** : c'est l'élément principal de la conversion mécano électrique qui est généralement une machine asynchrone ou bien synchrone. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre 600 kW et 5 MW.
- **Le système de commande** : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **Un arbre** : qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Un système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).
- **Les pâles** : la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieurs à 40 tr/mn.



## **1.7 Type de systèmes**

Les systèmes de production d'énergie sont deux types : autonomes et reliés au réseau.

### **1.7.1 Systèmes autonomes**

Ce sont des systèmes de production d'énergie complètement indépendants d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera un système de stockage pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

### **1.7.2 Systèmes connectés au réseau**

Dans ce cas le système est couplé directement au réseau électrique à l'aide des convertisseurs d'électronique de puissance. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins qu'une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité ne soit voulue. L'énergie produite est consommée sur place, le surplus étant injecté dans le réseau, alimente les utilisateurs en cas d'absence de soleil et de vent [4,12].

## **1.8 Description des différents types de stockage**

Les unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Correctement dimensionnées, elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez.

Nous allons voir les différents types de stockage d'énergie dans le cas d'un système de petite puissance [13].

### **1.8.1 Les batteries**

Les batteries d'accumulateurs sont la solution la plus utilisée pour un stockage électrochimique de faibles dimensions. Proposant des technologies matures et à des prix raisonnables, elles réalisent une réaction d'oxydoréduction selon le principe de la pile pour emmagasiner à la charge de l'énergie électrique, qui peut être restituée à la décharge avec un bon rendement, autour de 85 % selon les types d'accumulateurs. Elles consistent en deux électrodes, l'anode et la cathode, plongées chacune dans une solution ionique, comme

représentées figure 1.12. Sous l'effet d'un courant de charge, une oxydation se produit au niveau des molécules de la cathode, qui perdent alors des électrons. Ceux-ci sont envoyés dans le circuit électrique, créant ainsi le courant en question. À l'anode, les électrons arrivent ensuite pour générer une réduction sur les molécules qui la composent. Les ions qui résultent de ces deux demi-équations se retrouvent ainsi dans les solutions ioniques respectives des électrodes. Celles-ci sont séparées par un électrolyte, une solution ionique non réactive. Selon les besoins, ces ions positifs et négatifs migrent respectivement vers la solution de l'anode et de la cathode, permettant de rendre les deux solutions électriquement neutres. À la décharge, les réactions d'oxydation et de réduction inverses se produisent sous l'effet du courant inverse qui fait cette fois migrer les électrons de l'anode à la cathode. Les concentrations d'ions diminuent dans les solutions au fur et à mesure que les électrodes se reconstruisent, et l'électrolyte se reconstitue en conséquence. Plusieurs technologies ont au cours du dernier siècle été développées selon ce principe : accumulateurs au plomb, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique et au lithium.

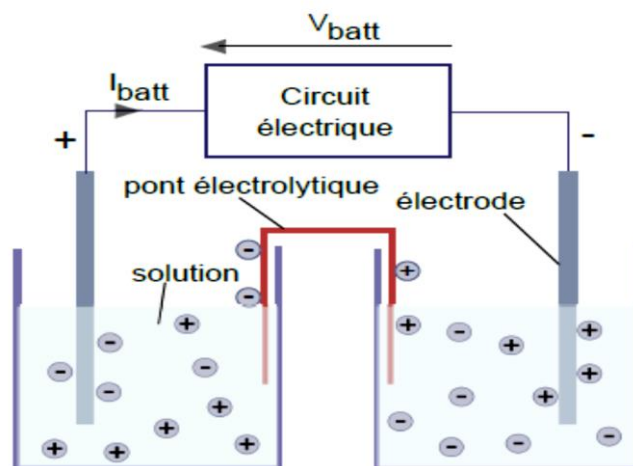


Figure 1.12 Schéma de principe de la batterie

### 1.8.2 Les supercondensateurs

Solutions alternatives ou complémentaires aux batteries existant depuis 20 ans, les supercondensateurs s'apparentent à des condensateurs possédant une très grande capacité. Selon le même principe que les batteries, un supercondensateur est composé d'un électrolyte séparant deux électrodes conçues dans un matériau poreux, comme le charbon actif, afin d'en démultiplier la surface spécifique. Elles sont chacune connectées à un collecteur d'électrons qui se charge de faire transiter ceux-ci de l'une à l'autre dans le circuit électrique, suivant le courant de charge ou décharge. Face au déficit d'électrons dans une des électrodes et de

l'excédent dans l'autre, les ions respectivement négatifs et positifs de l'électrolyte viennent s'agglomérer contre l'électrode de charge complémentaire, formant ainsi une double couche en équilibre statique à chaque électrode, mais avec une différence de potentiel au sein de l'électrolyte. La charge est complète quand l'électrolyte a atteint son potentiel de dissociation ; la surface des électrodes doit donc être suffisamment vaste pour accueillir suffisamment d'ions pour atteindre cet état, et ainsi maximiser la capacité du composant. Ce principe est récapitulé figure 1.13.

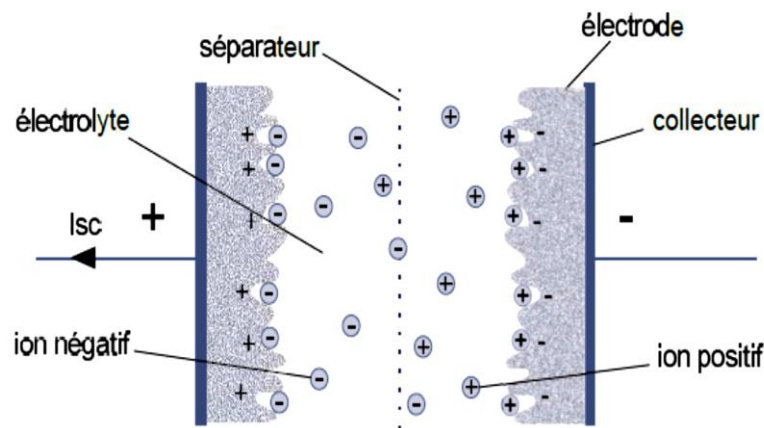


Figure 1.13 Schéma de principe des supercondensateurs

### 1.8.3 Les piles à combustible

La pile à combustible est annoncée comme étant une solution de stockage d'avenir. Elle permet de stocker un combustible, et de le faire réagir comme réducteur avec du dihydrogène dans une oxydoréduction, suivant le même mécanisme que la batterie. Notamment, le dihydrogène peut être utilisé comme réducteur, produisant en réaction avec le dioxygène de l'eau. Il peut être produit à partir du méthane, ou par électrolyse de l'eau en rejetant du dioxygène, ce qui en fait dans ce cas une source d'énergie parfaitement propre.

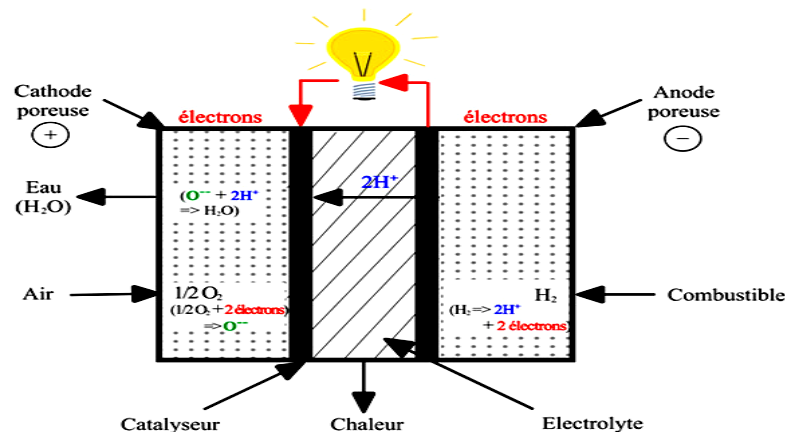


Figure 1.14 Schéma de principe de la pile à combustible

Une pile à combustible utilisant du dihydrogène contient des cathodes poreuses, souvent en graphite, imprégnés de platine, catalyseur nécessaire à l'oxydation de celui-ci. Utilisables dans des systèmes de petite et moyenne puissance, allant des alimentations en site isolé aux véhicules électriques, les piles à combustibles ont selon la technologie utilisée un rendement allant de 30 à 60%, et une énergie spécifique autour de 30 kWh/kg.

#### **1.8.4 Les volants d'inertie**

Le dernier type de stockage considéré est le volant d'inertie, dont le principe existe depuis plusieurs milliers d'années. Un volant d'inertie est un cylindre massif monté à l'extrémité d'une machine tournante. Lorsque de l'énergie provenant du circuit électrique doit être stockée, la machine en mode moteur fait tourner le volant, l'emmagasinant ainsi sous forme d'énergie cinétique. Si de l'énergie doit être restituée, la machine se met en mode génératrice pour produire un courant générateur en freinant le volant. Ce dernier peut être de différents rayons et épaisseurs, selon l'inertie  $J_{vi}$ , et donc l'énergie et la puissance maximales souhaitées.

Propre, d'une bonne puissance spécifique et d'un rendement de l'ordre de 80%, cette solution possède une énergie spécifique de seulement quelques dizaines de Wh/kg pour une puissance spécifique de plusieurs kW/kg, ce qui la rend adaptée aux mêmes usages que les supercondensateurs. L'inconvénient de cette technologie réside dans la dangerosité d'un volant tournant à pleine vitesse. Bien que réclamant peu d'entretien, il nécessite une conception adaptée à la protection des personnes et est encombrant, ce qui n'est pas forcément viable dans le cas un système de puissance destiné à un particulier [13].

### **1.9 Futur énergétique**

La réduction de l'effet de serre passe par la diminution de la consommation de l'énergie fossile. Celle-ci est réalisée en augmentant la contribution des énergies renouvelables dans la production électrique tout en assurant l'efficacité énergétique du système. En effet, l'association des sources d'énergies renouvelables et conventionnelles permet d'exploiter les différents potentiels énergétiques d'une région donnée et donc de réduire la consommation du fuel. Ce couplage est généralement associé aux unités de stockage d'énergie pour assurer une autonomie des sites isolés ou insulaires. Les évolutions technologiques de ces dernières années permettent aussi de réaliser une interconnexion entre plusieurs systèmes de production électrique géographiquement éloignés en assurant une gestion "intelligente" du flux énergétique [14].

Ce type de réseaux électriques dits "intelligents" (smart grid) intègre différentes technologies comme illustré sur la figure 1.15.



Figure 1.15 Vision futuriste du réseau électrique [14]

Dans le cas du grand réseau dit intelligent que dans celui du système isolé, on peut comprendre qu'il s'agit de réaliser dans les meilleures conditions possibles la "gestion" des flux énergétiques. C'est une condition sine qua non de la maîtrise de la qualité de l'énergie électrique distribuée et de la durée de vie des équipements en interaction. Pour ces raisons, l'électronique de puissance, associée aux éléments de stockage et la connexion avec la charge, est un élément central, dans notre étude. Le bon choix (dimensionnement) des constituants et la bonne régulation des grandeurs déterminent la qualité de l'énergie et la performance du système.

## 1.10 Conclusion et problématique

Dans ce chapitre, un état de l'art des différents types de production d'électricité basés sur les énergies renouvelables a été présenté, en nous focalisant davantage sur les filières éoliennes, photovoltaïques et les technologies associées. Ainsi ont été présentés le développement et le potentiel énergétique éolien et photovoltaïque en Algérie ainsi que des

généralités sur les systèmes photovoltaïques et éoliens sur lesquelles nos études vont s'appuyer.

Les technologies d'énergies renouvelables demeurent capables de générer l'électricité sur place grâce aux architectures spécifiques de petites éoliennes ou des installations photovoltaïques destinées spécialement aux sites isolés avec stockage d'énergie pour ajuster la production suivant l'intermittence de la source et la demande de l'utilisateur. Pour une intégration de ces sources d'énergies renouvelables au réseau ou une utilisation autonome optimale, il est nécessaire de maîtriser la gestion des différentes sources afin d'ajuster les déficits et surplus de production pour assurer la fourniture souhaitée d'énergie électrique.

Actuellement, la plupart des systèmes de conversion d'énergie éolienne sont conçus pour fonctionner à des vitesses variables. L'utilisation du générateur synchrone à aimant permanent dans les systèmes éoliens à vitesse variable devient très intéressante à cause des performances élevées qu'ils offrent et la possibilité d'extraction de l'énergie optimale. À cause de la nature fluctuante du vent qui provoque une variation de fréquence à la sortie du générateur, il est nécessaire de lier ce dernier avec la charge par des convertisseurs statiques. L'utilisation de ces dispositifs d'électronique de puissance provoque des perturbations ou pollutions harmoniques dans le système. Face à ce problème, un modèle de filtrage passif est traité dans ce travail pour minimiser ces harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie fournie à la charge.

Le stockage d'énergie par les supercondensateurs s'avère très intéressant pour lisser la puissance grâce à des temps de cycle de l'ordre de la seconde et des densités de puissance élevées. Il est nécessaire de bien maîtriser le déclenchement des commutations et les énergies stockées pour optimiser le stockage et sa restitution par ces dispositifs souvent complémentaires aux batteries. Le cas du stockage d'énergie photovoltaïque est traité dans cette thèse avec l'objectif d'établir un modèle de stockage permettant de juger l'efficacité du transfert d'énergie entre la source photovoltaïque, les supercondensateurs et la charge.

Dans ce travail, les modèles permettant de montrer les efficacités et le comportement énergétique des deux systèmes de conversion d'énergie intermittente (photovoltaïque et éolienne) sont détaillés. Les résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec un filtrage passif pour la connexion avec la charge et ceux du système de stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs pour une application autonome sont montrés et discutés.

# *Chapitre 2*

*Modélisation et simulation  
de la turbine éolienne*

## 2.1 Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à l'étude et à la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne [15]. La modélisation de la chaîne exige celle du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance lie au système de commande. Ce chapitre est composé de trois parties :

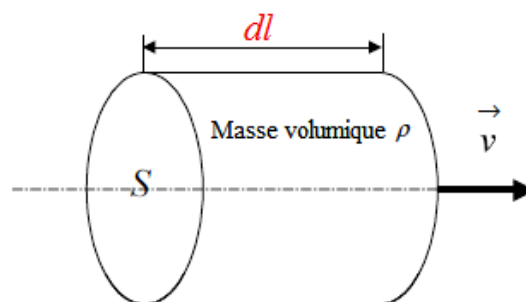
- Dans la première partie, le modèle du vent et son évolution seront étudiés, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ses principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance et de couple et la limite de Betz.
- La deuxième partie est consacrée à la représentation des différentes structures des machines électriques utilisées dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne.
- Dans la dernière partie notre choix apporté sur une meilleure structure adaptée pour une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).

## 2.2 Conversion de l'énergie éolienne

### 2.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [4,6]. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , (figure 2.1) s'écrit :

$$dE = \frac{1}{2} \rho S dl v^2 \quad (2.1)$$



**Figure 2.1** Colonne d'air [6]



La puissance  $P_m$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant  $dl=vdt$ , on déduit l'expression de  $P_m$  :

$$P_m = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (2.2)$$

$\rho$  : masse volumique de l'air (en  $\text{kg/m}^3$ )

$v$  : vitesse instantanée du vent (en  $\text{m/s}$ )

$E$  : énergie cinétique (en J)

### 2.2.2 Loi de Betz

La loi de Betz stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de  $16/27=0.592$ , soit 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui en 1929 formula cette loi pour la première fois. Considérons le système de la figure 2.2 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal.  $V_1$  représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et  $V_2$  la vitesse en aval [16].

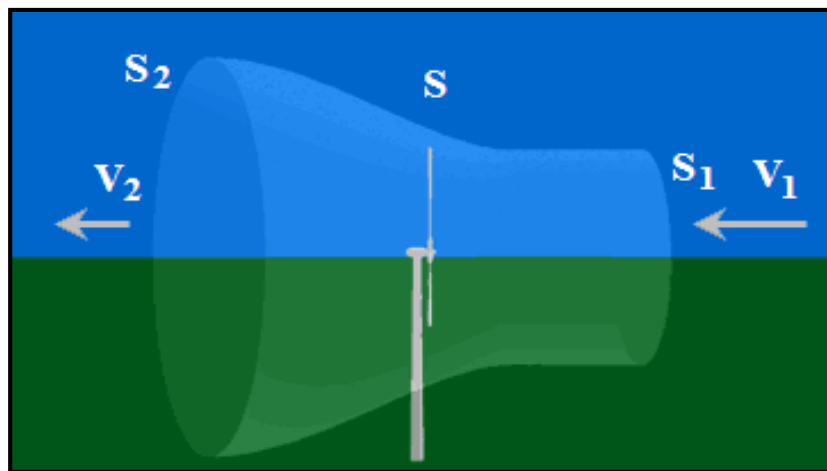


Figure 2.2 Tube de courant autour d'une éolienne [16]

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, de la surface et de la vitesse moyenne [2,15].

$$m_0 = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (2.3)$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval.

$$P_m = \frac{m_0(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2.4)$$

En remplaçant  $m_0$  par son expression dans (2.4), la puissance devient :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2.5)$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface  $S$  est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant  $V_2=0$  dans l'expression (2.5). On obtient :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (2.6)$$

$P_{mt}$  est la puissance théorique fournie à la turbine.

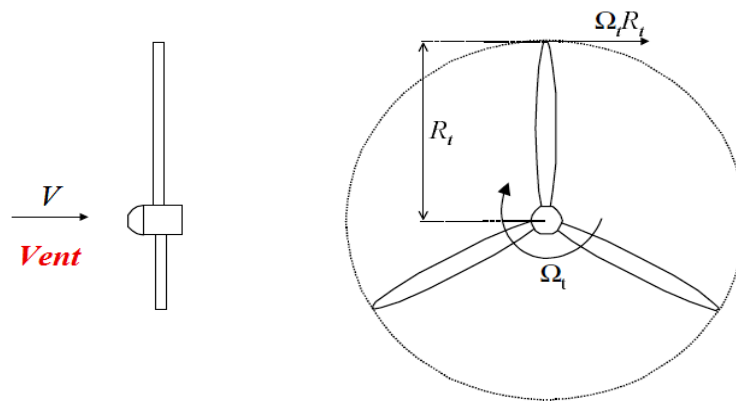
$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$  est la densité de l'air.

$S = \pi.R^2$  où  $R$  est la longueur de pôle.

### 2.2.3 Le ratio de vitesse (tip-speed ratio)

On définit le ratio de vitesse  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t R_t$  sur la vitesse instantanée de vent  $V$ . Il est donné par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (2.7)$$



**Figure 2.3** Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage ( $\Omega_t R_t$ ) [6]

$\Omega_t$  : vitesse de rotation de la turbine éolienne en rad/s.

$R_t$  : rayon de la surface balayée en  $m$ .

$V$  : vitesse de vent est exprimée en  $m/s$ .

### 2.2.4 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance par le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \left[\frac{V_2}{V_1}\right]\right] \left[1 - \left[\frac{V_2}{V_1}\right]^2\right]}{2} \quad (2.8)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est variable, il est en fonction de la vitesse du vent  $V$  et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$  ainsi que les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage  $\beta$ . Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de  $16/27$  soit  $0.593$ .

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance  $C_p$ , et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de Betz ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [1,3]:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max} \quad (2.9)$$

$C_{p \max}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à un ratio de vitesse nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_m$ . En pratique, la valeur du maximum du coefficient de puissance approche la valeur de  $0.48$  avec une turbine tripale, ce qui donne un rendement aérodynamique de  $81\%$  pour les turbines éoliennes actuelles.

### 2.2.5 Coefficient de couple (torque coefficient)

Le coefficient de couple  $C_m$  est assez proche du coefficient de puissance  $C_p$ . Il est fort utile pour estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation  $\Omega_t$  nulle. En effet, à rotor bloqué, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales mais la puissance est nulle, ce qui correspond à une valeur de  $C_p$  nulle pour une valeur de  $C_m$  non nulle.

En combinant les équations (2.6), (2.7), et (2.8), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{2.10}$$

avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_1} \tag{2.11}$$

L'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \tag{2.12}$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule qui suit :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \tag{2.13}$$

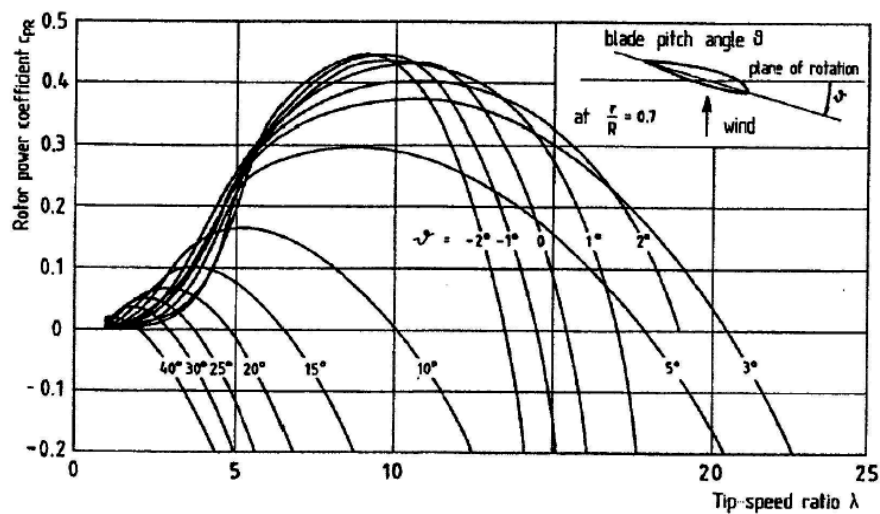
avec :

$T_t$  : couple de la turbine éolienne

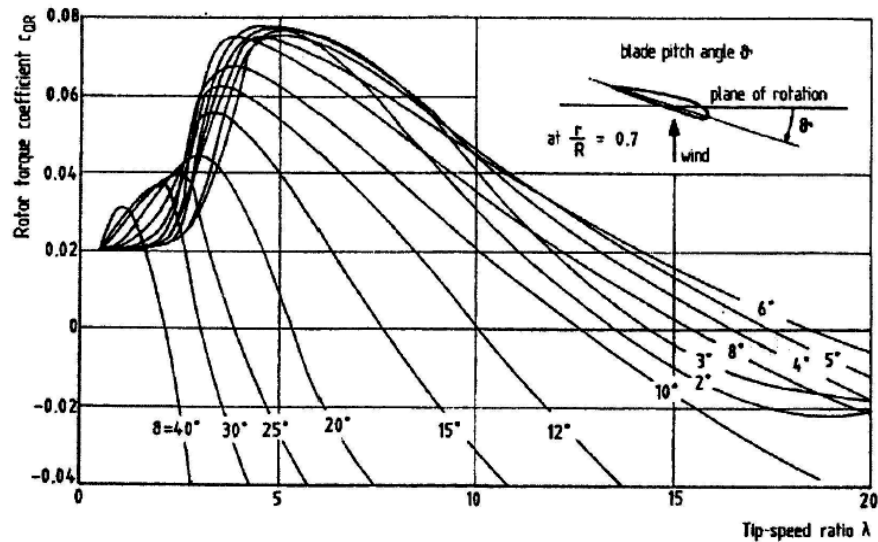
Le coefficient  $C_m$  est, comme le coefficient  $C_p$ , fonction de la vitesse du vent  $V$  et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ .

### 2.2.6 Caractéristiques des turbines éoliennes

Les turbines sont caractérisées par les courbes de  $C_p$  et  $C_m$  en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$ . En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients  $C_p$  et  $C_m$  change donc pour chaque angle de calage  $\beta$  comme représenté sur la figure 2.4 [1,3].



(a)  $C_p = f(\lambda, \beta)$



(b)  $C_m = f(\lambda, \beta)$

Figure 2.4 Allures des coefficients  $C_p$  et  $C_m$  en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$

### 2.2.7 Nombre de pales

Les éoliennes utilisant des organes capteurs à axe horizontal sont les plus répandues car leur rendement est supérieur (voir figure 2.5). Dans la suite du travail, on parlera uniquement d'éoliennes à axe horizontal [3,4].

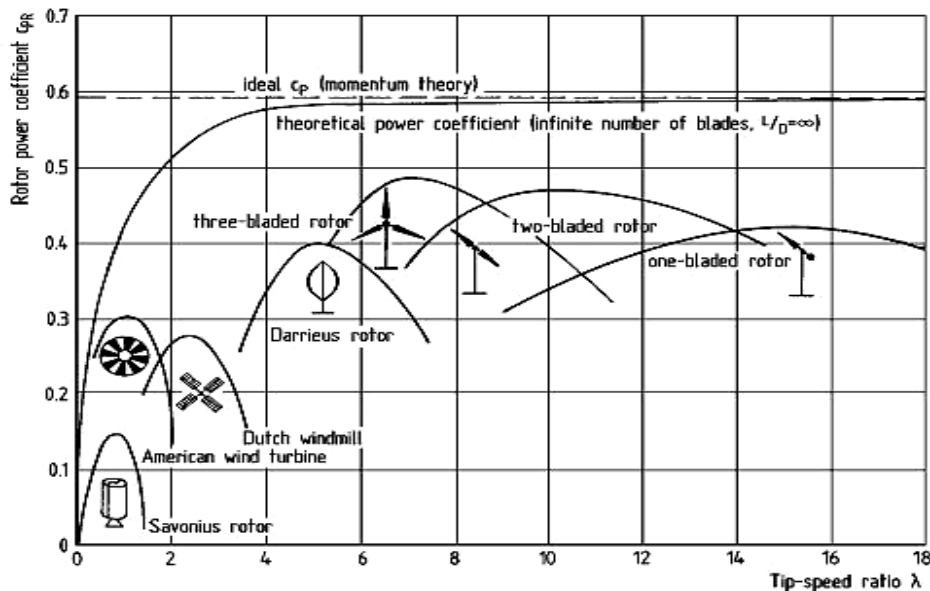


Figure 2.5 Coefficients de puissance de diverses éoliennes [1]

La majorité de ces éoliennes possèdent trois pales. Théoriquement, plus le nombre de pale est élevé, meilleur est le rendement aérodynamique. Une turbine possédant trois pales est dynamiquement plus stable et a un meilleur impact visuel. Une turbine équipée d'une seule pale nécessite un contre poids. Pour une turbine à deux pales, des vibrations cycliques

importantes peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les pales sont à l'horizontal (voir figure 2.6).

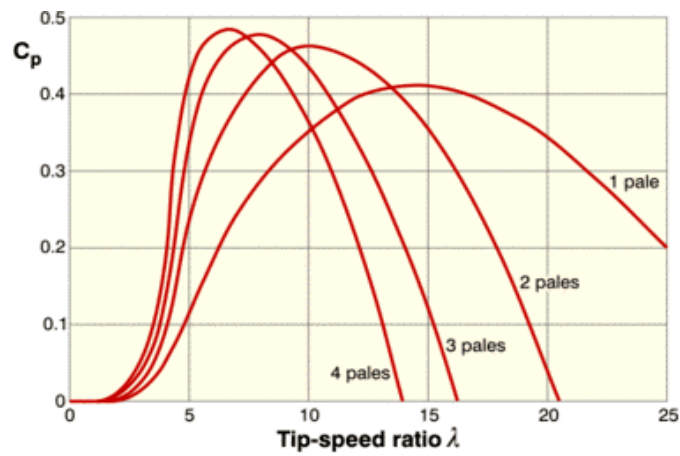


Figure 2.6 Influence du nombre de pales sur le rendement

## 2.2.8 Production d'énergie mécanique

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.14)$$

avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (2.15)$$

où  $\Omega_1$  est la vitesse de rotation à l'entrée du multiplicateur et  $R$  est le rayon de la turbine éolienne [7,15].

En introduisant le rapport du multiplicateur de vitesse  $G$ , la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur électrique  $P_{mg}$  s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.16)$$

où  $\Omega_2$  est la vitesse de rotation à la sortie du multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent comme le montre la figure 2.7.

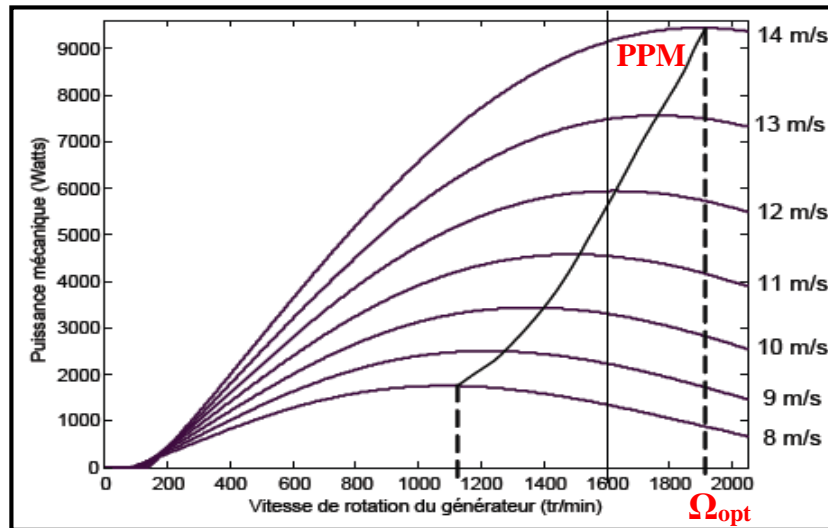


Figure 2.7 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Il est bien clair sur la figure 2.7, que les maxima des courbes des puissances ne sont pas exploités si la génératrice fonctionne à vitesse fixe. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine doit tourner à vitesse variable [1,12].

### 2.2.9 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

#### 2.2.9.1 Bilan des forces sur une pale

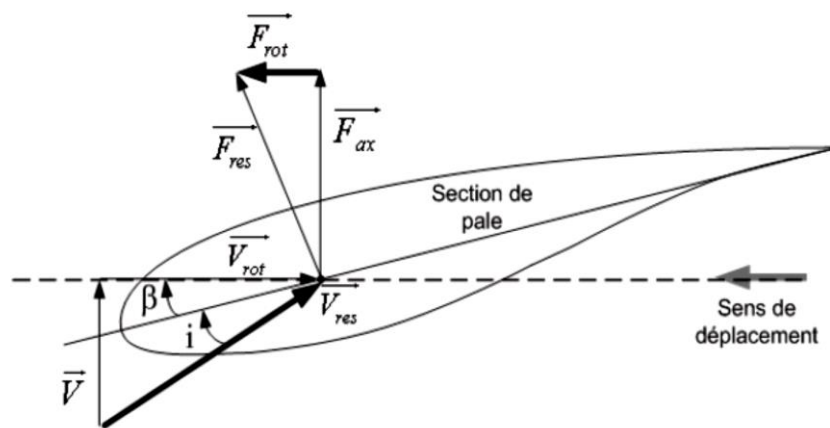


Figure 2.8 Bilan des forces sur une pale

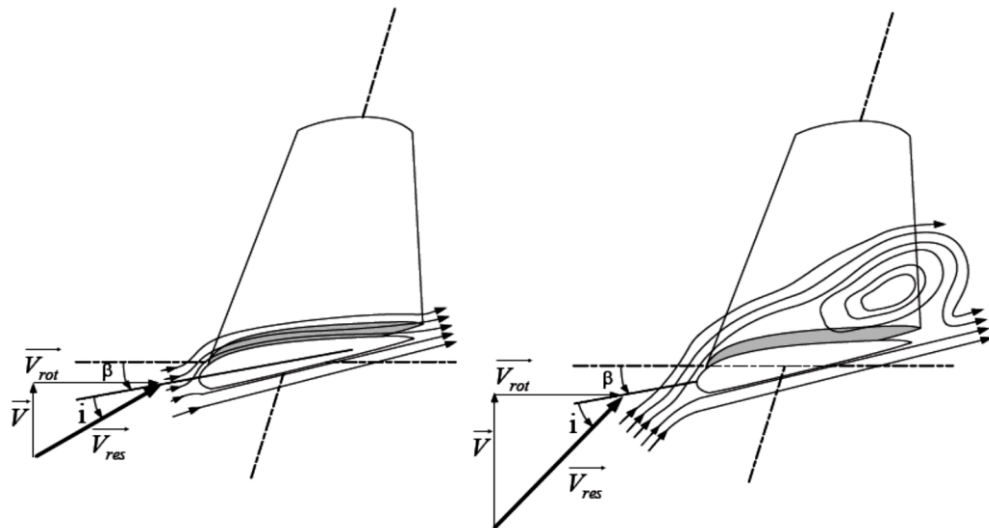
La figure 2.8 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se

décompose en une poussée axiale  $\overrightarrow{F_{ax}}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\overrightarrow{F_{rot}}$  qui produit effectivement le déplacement [1].

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [11,16].

### 2.2.9.2 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

#### a) Système à décrochage aérodynamique "stall"



**Figure 2.9** Flux d'air sur un profil de pale " stall " [1]

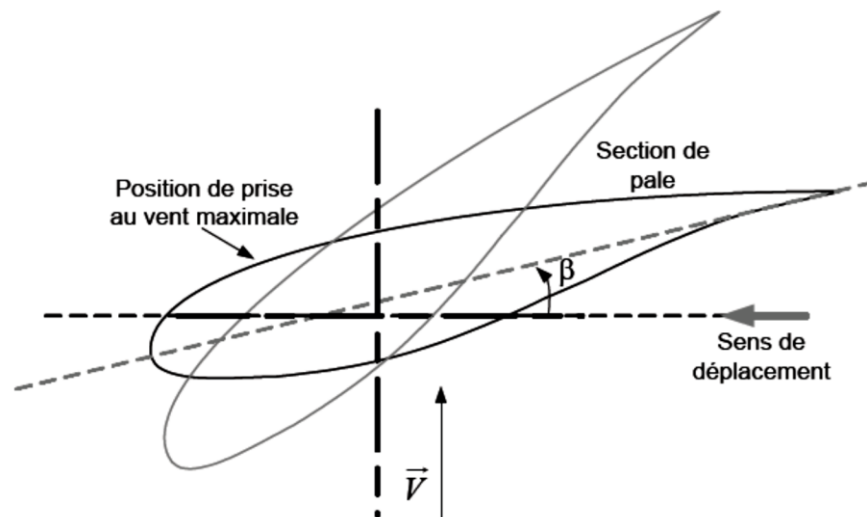
La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (voir figure 2.9) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même



(système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage  $\beta$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fourni par l'éolienne est ainsi moins importante.

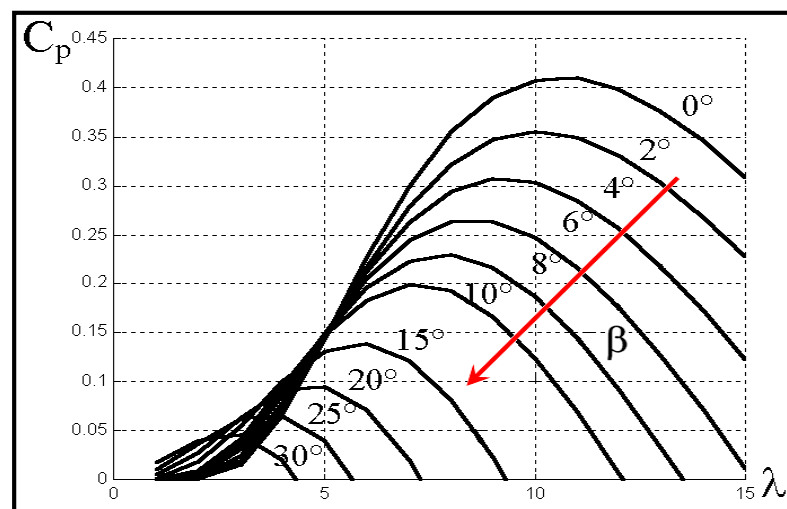
a) *Système d'orientation des pales "pitch"*



**Figure 2.10** Variation de l'angle de calage  $\beta$  d'une pale

Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle d'orientation  $\beta$ , et par conséquent entraîner une baisse du coefficient de puissance  $C_p$ .

La figure 2.11 illustre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et du ratio de vitesse de la turbine  $\lambda$ .



**Figure 2.11** Influence de l'angle d'orientation  $\beta$  sur le coefficient de puissance

### 2.2.9.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

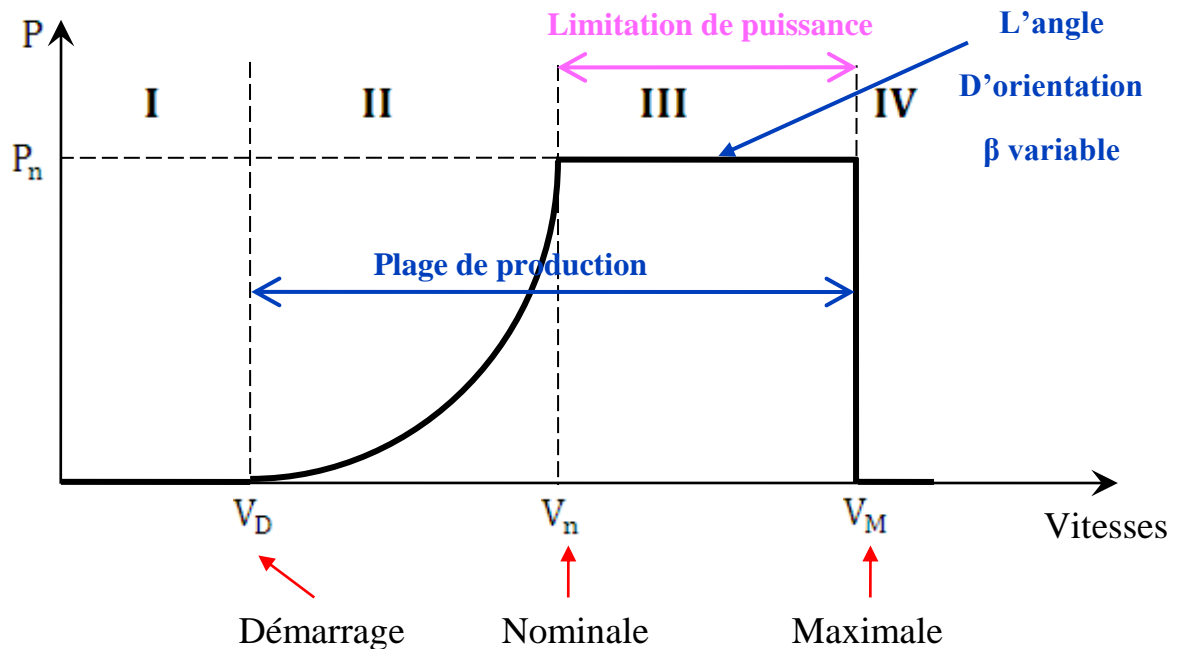


Figure 2.12 Courbe de production typique d'un aérogénérateur

**Zone I :**  $V < V_D$  : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

**Zone II :**  $V_D < V < V_n$  : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

**Zone III :**  $V_n < V < V_M$  : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine ( $P_n$ ). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch ». Elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyennes à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure. La seconde technique est de type passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un

décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées [1,16].

## 2.3 Modélisation d'une turbine éolienne

### 2.3.1 Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, les domaines aérodynamique, mécanique et électrique, et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine.

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine. Le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler les performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes et peut être représenté comme la figure 2.13 [17].

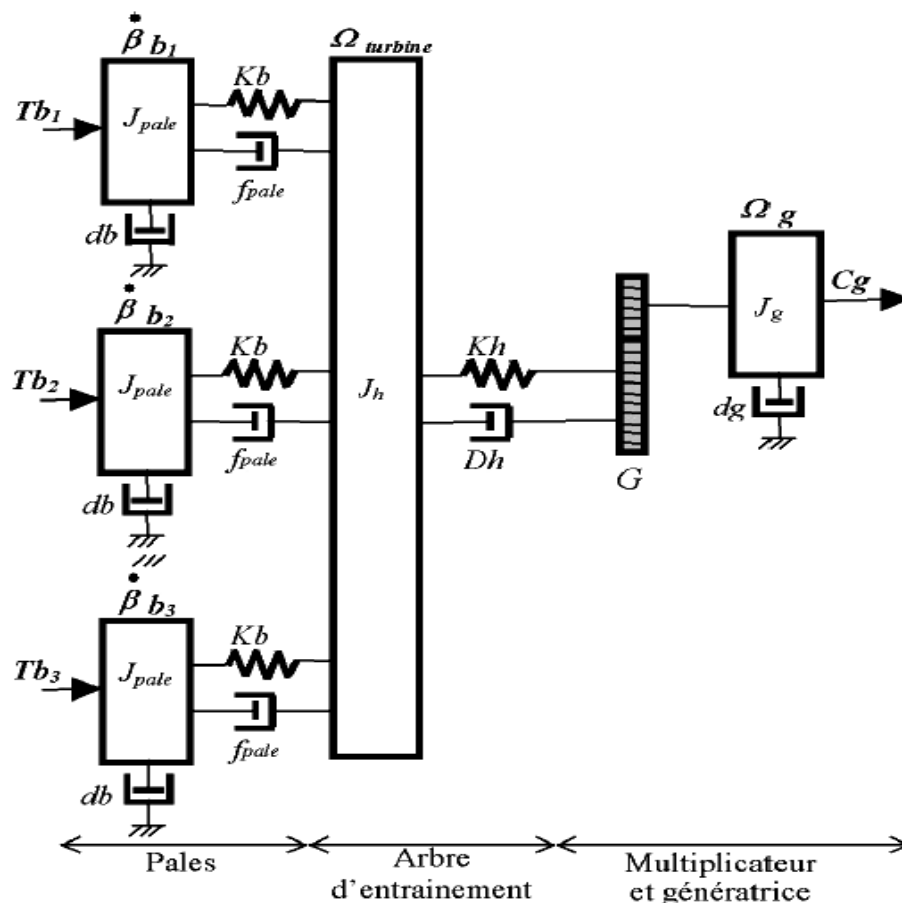


Figure 2.13 Système éolien [15]

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie  $J_{pale}$
- la même élasticité  $K_b$
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$ .

Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie  $J_h$
- son élasticité  $Kh$
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $Dh$

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie  $Jg$
- un coefficient de frottement  $dg$

Ce rotor transmet un couple d'entraînement ( $C_g$ ) de la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ .

### 2.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'études électromécaniques sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [15,17]:

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- 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 et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple représenté par la figure 2.14.

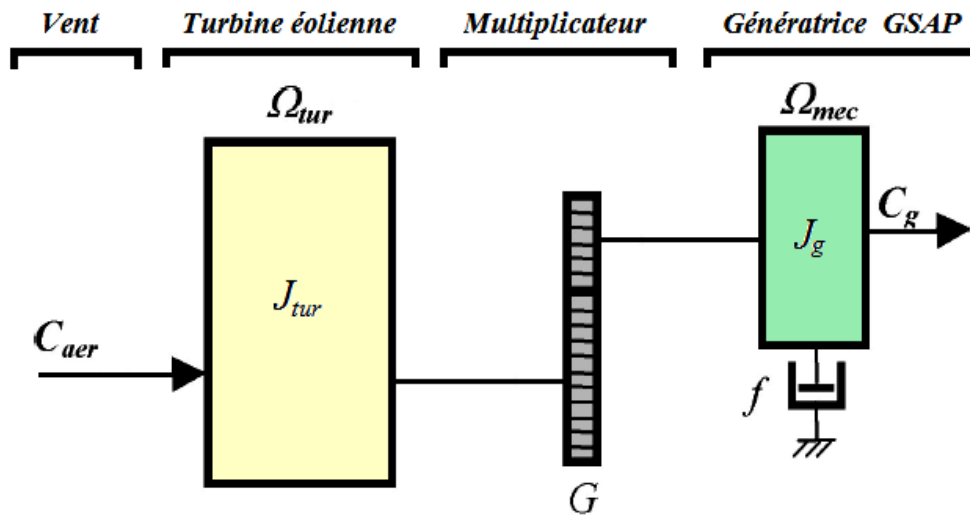


Figure 2.14 Modèle simplifié de la turbine éolienne

### 2.3.3 Modèle de la chaîne de production d'énergie éolienne

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

- 1- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes.

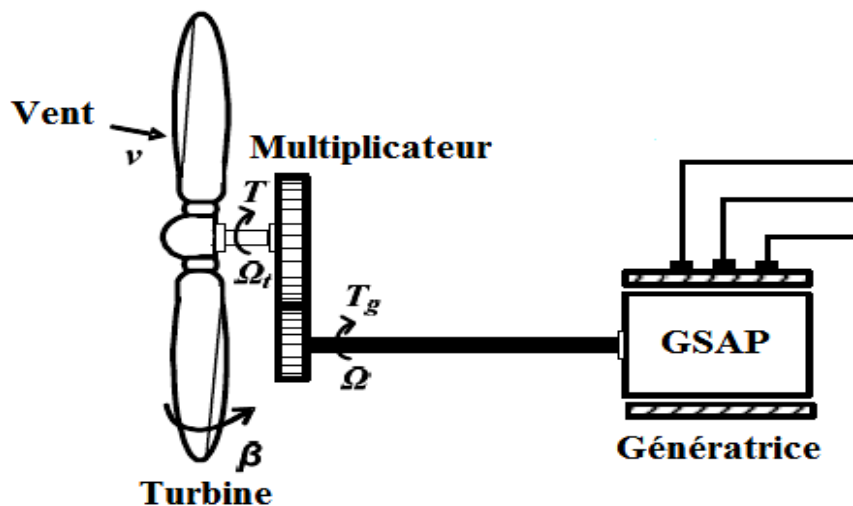


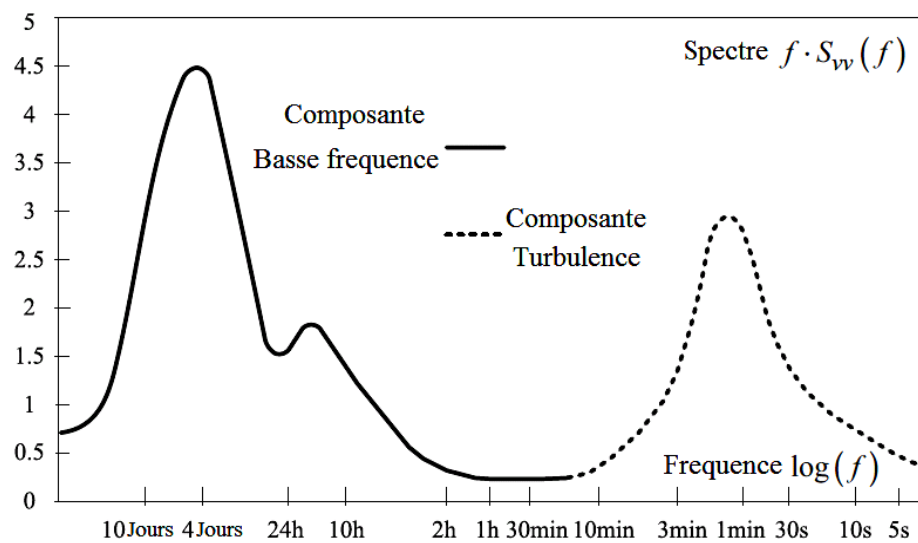
Figure 2.15 Chaîne de production d'énergie éolienne

### 2.3.4 Modèle du vent (source primaire)

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacements des masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

La modélisation du vent est habituellement effectuée sur deux échelles de temps, à savoir  $ts_1$  pour la vitesse du vent moyenne et  $ts_2 < ts_1$  pour la turbulence. Parfois, une troisième composante peut être incluse pour tenir compte des effets d'ombrage de la tour et du cisaillement du vent durant la rotation de la turbine (figure 2.16) [16].



**Figure 2.16** Spectre d'énergie des mouvements atmosphériques d'après Van der Hoven

$$V = F(t) \tag{2.17}$$

La vitesse du vent sera modélisée, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V(t) = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t) \tag{2.18}$$

### 2.3.4.1 Expression du vent en un point fixe

La vitesse du vent en un point  $v_0(t)$  peut-être décomposée suivant la somme d'une composante moyenne  $V_{moy}$  (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations  $v_t(t)$  :

$$v_0(t) = V_{moy} + v_t(t) \quad (2.19)$$

$V_{moy}$  : vitesse moyenne du vent.

$v_t$  : composante représentant la turbulence du vent.

La turbulence du vent en un point donné dans l'espace, est stochastiquement décrite par l'intermédiaire de son spectre de puissance. Deux modèles communément admis sont le spectre de « Von Karman » et celui de « Kaimal ». Le filtre de Von Karman est régi par la fonction de transfert suivante :

$$H_t(j\omega) = \frac{K_F}{(1 + j\omega \cdot T_F)^{\frac{5}{6}}} \quad (2.20)$$

où, les paramètres  $K_F$  et  $T_F$  dépendent de la vitesse du vent à basse fréquence (gain  $K_F$  et constante de temps  $T_F$  du filtre respectivement). La composante turbulente de la vitesse du vent est simulée, à chaque échantillon de temps par la réponse du filtre de Von Karman, en imposant comme entrée un bruit blanc gaussien. Le filtre de Von Karman entraîne des difficultés numériques du fait qu'il est d'un ordre non-entier « 5/6 ». Ce filtre peut être approché par une fonction de transfert caractérisée par deux pôles et un zéro :

$$H_t(S) = K_F \frac{(1 + m_1 T_F S)}{(1 + T_F S)(1 + m_2 T_F S)} \quad (2.21)$$

avec :  $m_1=0.4$  et  $m_2=0.25$ .

La fonction de transfert, ci-dessus, présente un filtre d'un bruit blanc gaussien (l'entrée du filtre) générant la composante turbulente du vent (sortie du filtre), cette composante (la turbulence) de haute fréquence peut atteindre l'unité.

### 2.3.4.2 Le filtre spatial

Les vitesses du vent incidentes en deux points voisins sont corrélées et peuvent présenter un couple total nul (deux couples élémentaires qui tendent à s'annuler). Plus ces points sont éloignés l'un de l'autre et plus la turbulence en ces deux points est indépendante et sa répercussion sur le couple total diminue.

Dans ce cas, les composantes de hautes fréquences du couple total ont un module plus petit. Donc, la turbine filtre les fluctuations de hautes fréquences de la turbulence du vent. Il est nécessaire de traiter ces informations ponctuelles pour établir une image pratique du vent équivalent. Ceci est réalisé en utilisant un filtre, en aval, adéquat. Ce dernier est un filtre dont la fonction de transfert simplifiée est donnée par :

$$G(S) = \frac{1}{(1 + b.S)} \quad (2.22)$$

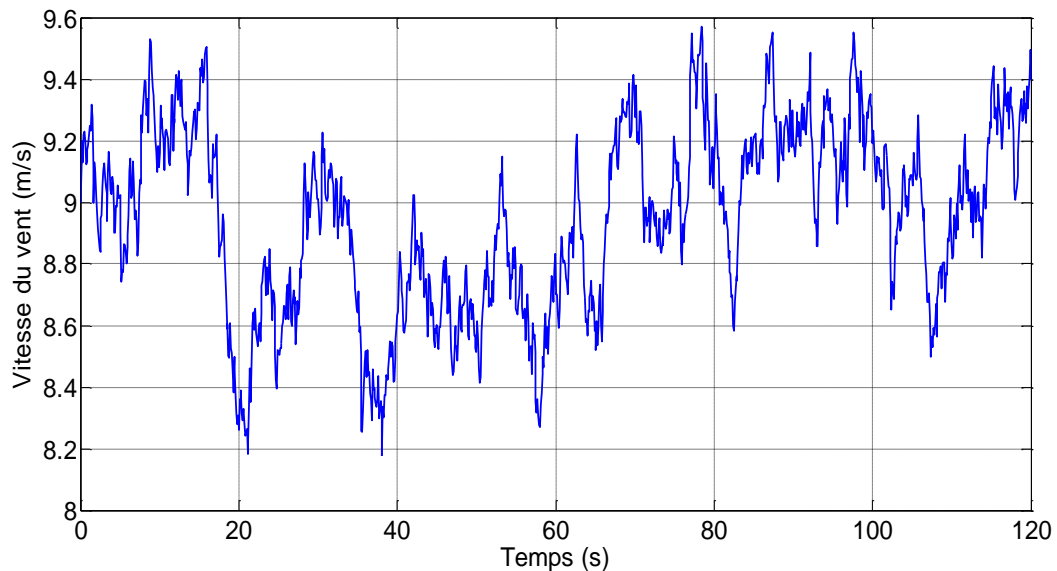
et :

$$b = \gamma \frac{R_T}{V_{moy}} \quad (2.23)$$

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

$R_T$  : rayon des pales de la voilure.

La figure 2.17 représente la vitesse du vent sans filtrage :



**Figure 2.17** Profil du vent sans filtrage



La figure 2.18 montre l'évolution de la vitesse du vent avec un filtre spatial :

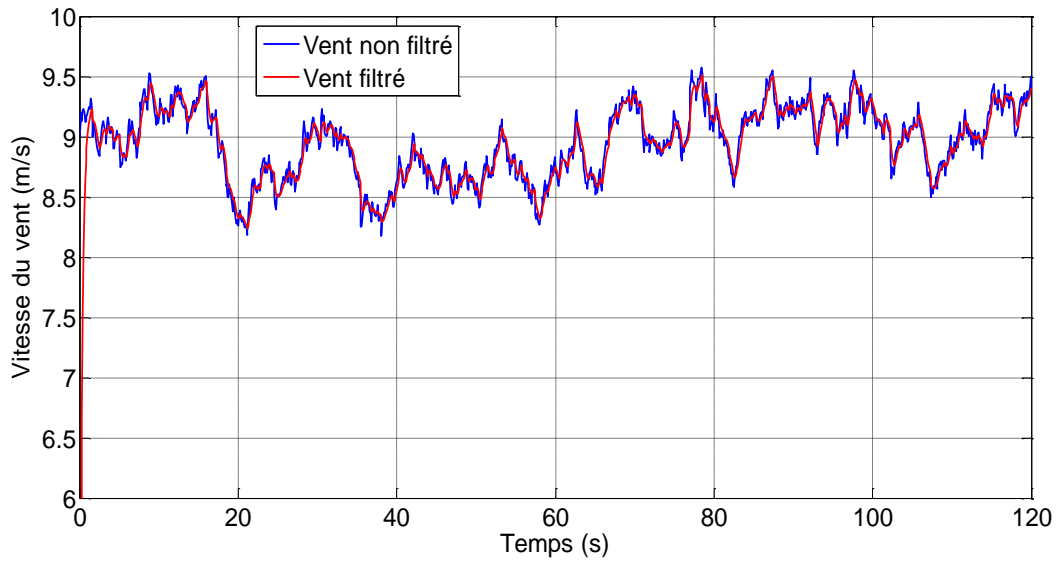


Figure 2.18 Profil du vent avec filtrage

### 2.3.5 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant trois pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (voir figure 2.19) [18].

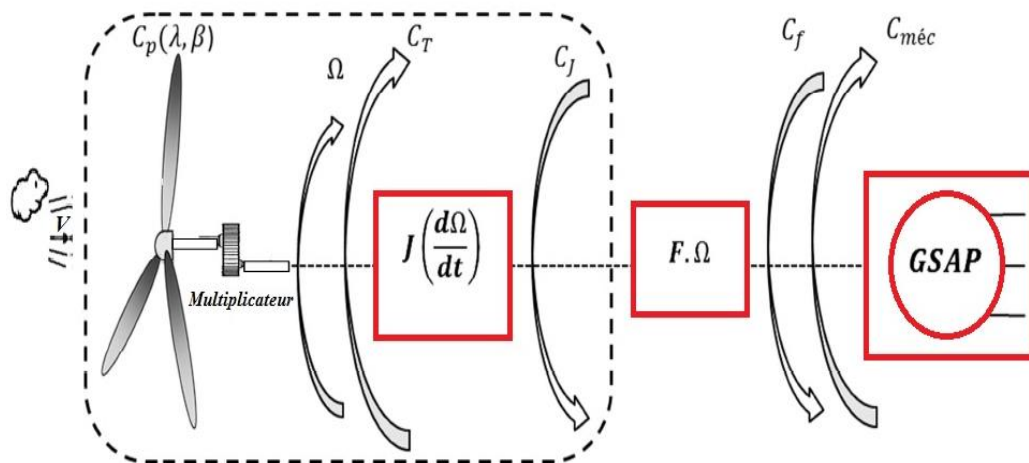


Figure 2.19 Schéma de la turbine éolienne

La puissance cinétique du vent ou puissance éolienne est donnée par l'expression suivante :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \tag{2.24}$$

$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$  est la densité de l'air.

$S = \pi.R^2$  est la surface circulaire balayée par la turbine,  $R$  est la longueur de pale.

$v$  est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique de la turbine est donnée par l'équation suivante :

$$P_t = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (2.25)$$

$P_m$  est la puissance réelle de la turbine.

$C_p$  est le coefficient de puissance qui représente le rendement de la turbine. Il dépend des caractéristiques de la turbine.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (2.26)$$

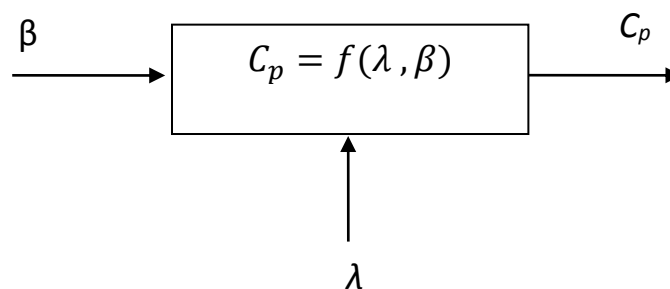
$\lambda$  est le ratio de la vitesse linéaire de la turbine et celle du vent.

$\beta$  est l'angle d'orientation des pales de la turbine.

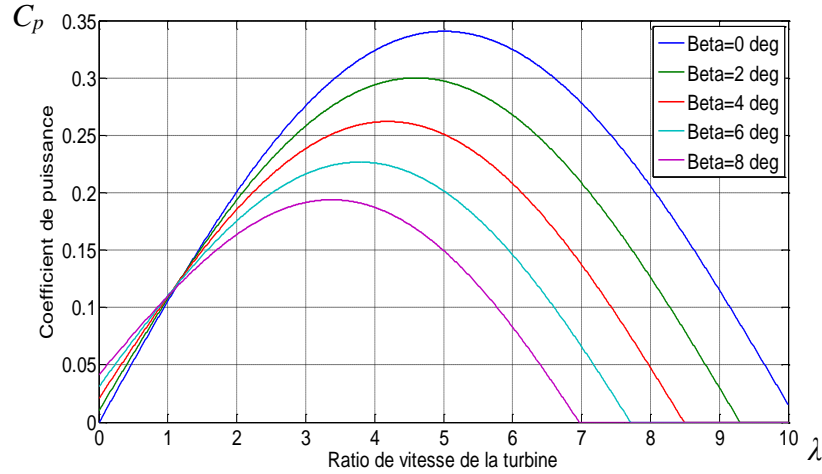
L'expression du coefficient de puissance est une valeur approchée de manière empirique, donné par l'équation suivante [19] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.3 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{10 - 0.3 \cdot \beta} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (2.27)$$

Figure 2.20 illustre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et du ratio de vitesse de la turbine  $\lambda$ .



(a) Schéma bloc du coefficient de puissance



**Figure 2.20** Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_{Turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \tag{2.28}$$

### 2.3.6 Modèle du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes [17] :

$$G = \frac{C_T}{C_g} \tag{2.29}$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turbine}} \tag{2.30}$$

La puissance captée par la turbine pourra donc s'écrire :

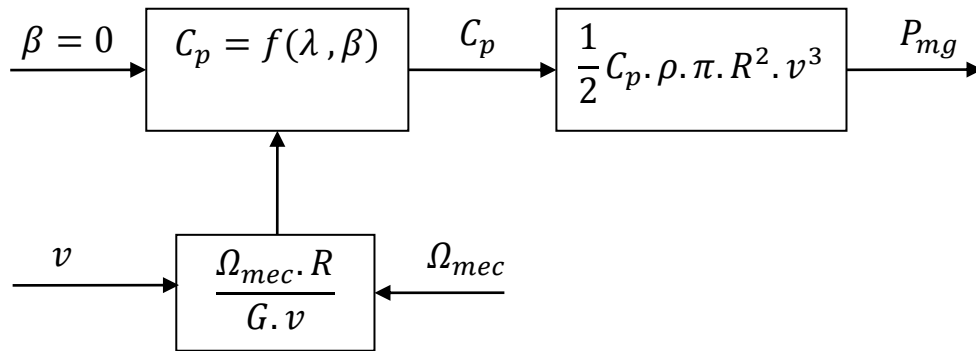
$$P_T = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p(\beta, \lambda) \cdot v^3 \tag{2.31}$$

Si on suppose  $\beta = 0$

$$P_T = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_T R}{G \cdot V} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \tag{2.32}$$

$G$  est le gain du multiplicateur.

Figure 2.21 représente la variation de puissance aérodynamique de la turbine éolienne en fonction de différentes vitesses du vent  $v$  pour  $\beta = 0$ .



(b) Schéma bloc de la puissance de la turbine

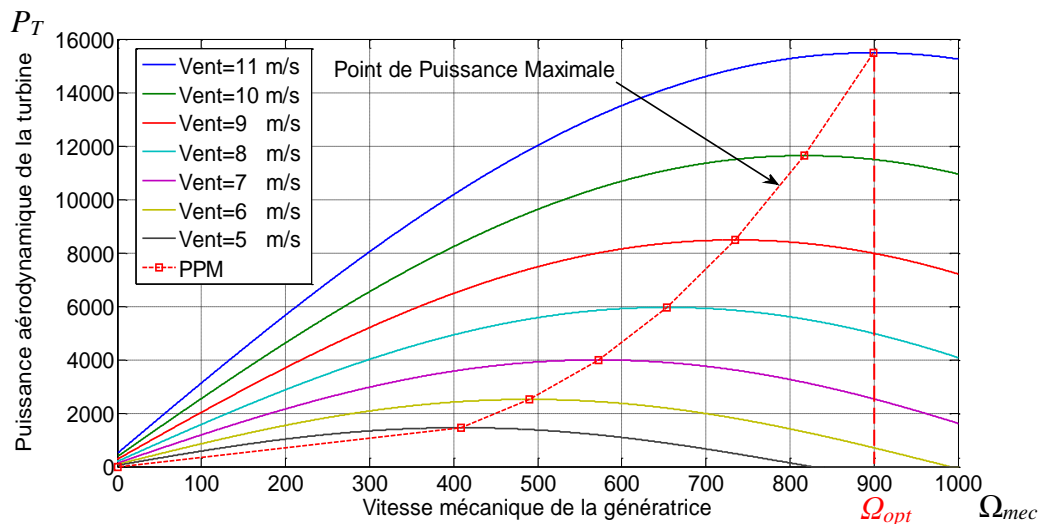


Figure 2.21 Puissance éolienne extraite en fonction de la vitesse de rotation

### 2.3.7 Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor [15,17] :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{2.33}$$

$J$  : inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et du multiplicateur.

$f$  : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{2.34}$$

$C_{em}$  : couple électromagnétique développé par la génératrice.

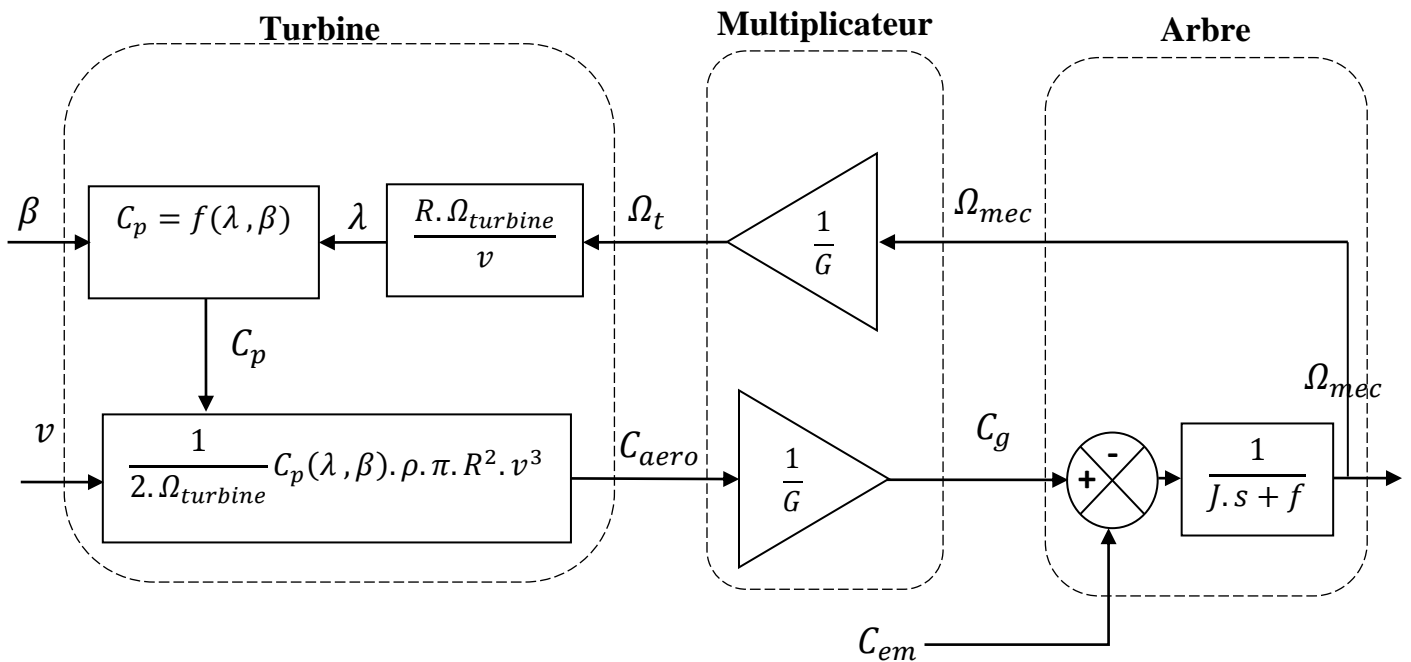
$C_g$  : couple issu du multiplicateur.

$C_f$  : couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \tag{2.35}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ .

On a le schéma bloc du modèle de la turbine éolienne suivant [15] :



(c) Schéma bloc représentant la turbine éolienne

## 2.4 Mode d'exploitation de l'énergie éolienne

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- a)- Les systèmes à vitesse fixe.
- b)- Les systèmes à vitesse variable.

Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

**a)- Fonctionnement à vitesse fixe :**

- Système électrique plus simple.
- Plus grande habilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

**b)- Fonctionnement à vitesse variable :**

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

## **2.5 Générateurs utilisés dans la production éolienne**

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éoliennes. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ le générateur asynchrone est plus courant et économique. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont ici présentés [20]:

### **2.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone**

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

#### **2.5.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil**

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts

glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour une utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure 2.22 [1].

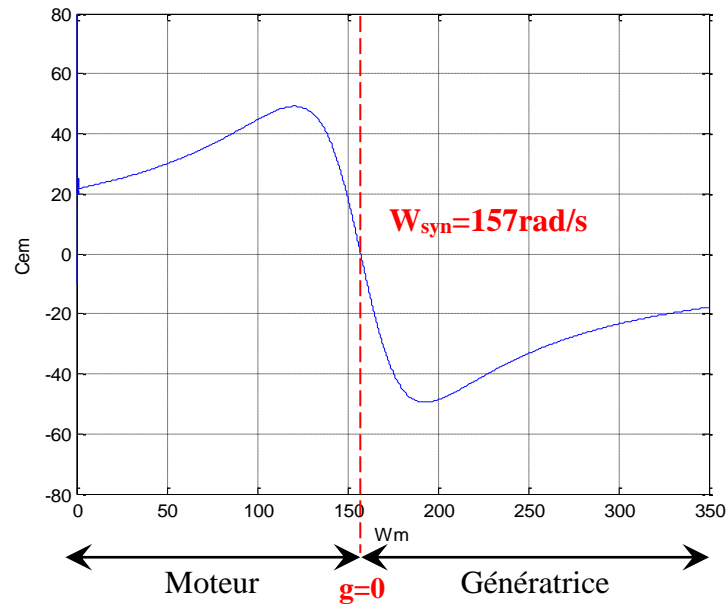


Figure 2.22 Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure 2.23) [11,16].

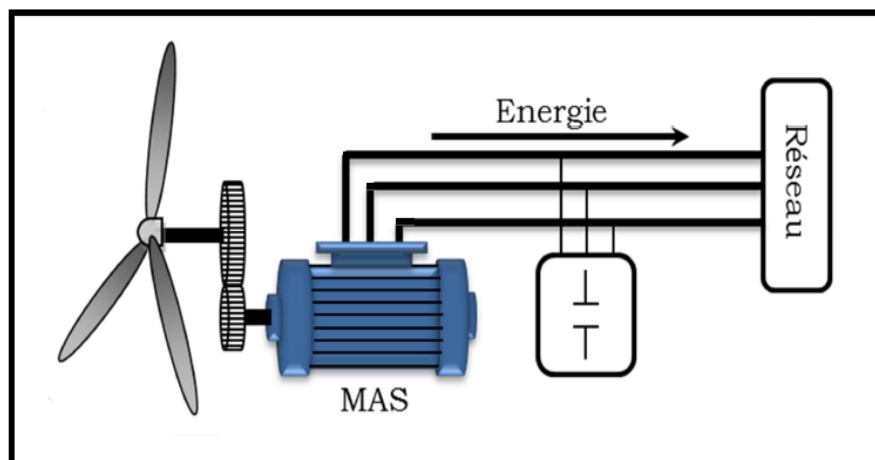


Figure 2.23 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

La machine à un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

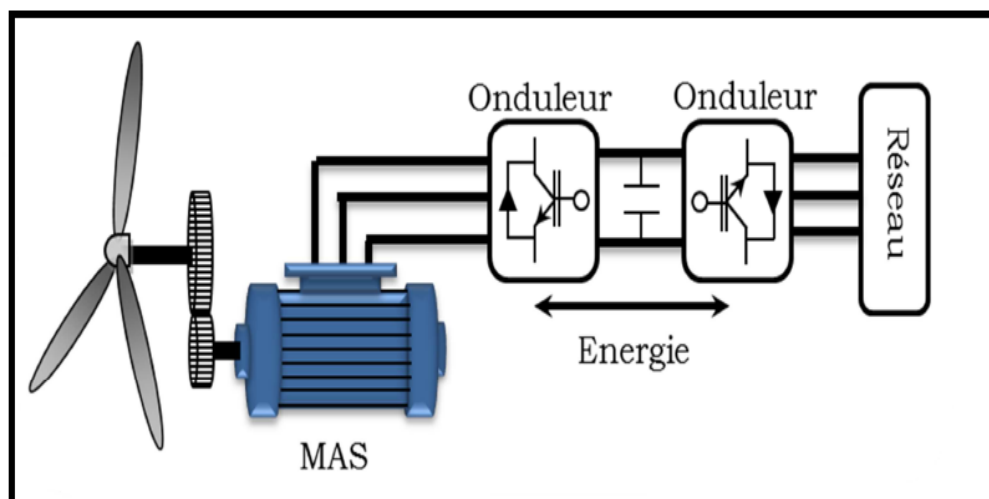
La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure 2.23, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Par contre, cette configuration présente quelques inconvénients :

- Il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induite dans le rotor.
- Elle ne permet pas une vitesse variable.
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause de la variation brusque du couple.
- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs.

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (voir Figure 2.24).



**Figure 2.24** Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance



**2.5.1.2 Machine asynchrone à double stator**

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (figure 2.25) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer deux vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = C_{em} \cdot \Omega_s \tag{2.36}$$

$P_{mg}$  : puissance transmise par la génératrice.

$C_{em}$  : couple électromagnétique.

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme.

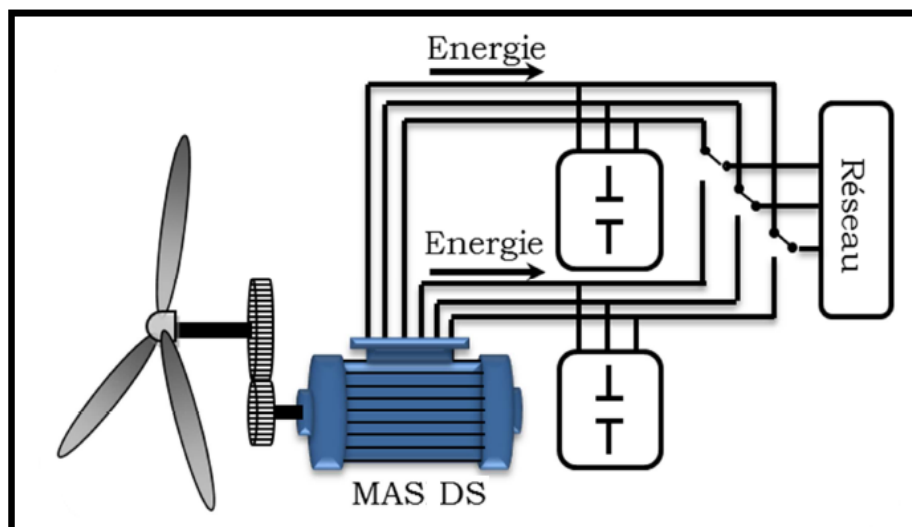
À une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{P} \tag{2.37}$$

$\omega$  : pulsation du réseau.

$P$  : nombre de paires de pôles.

À une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs.



**Figure 2.25** Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

De ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

### 2.5.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (figure 2.26). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et à l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage) [1].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.

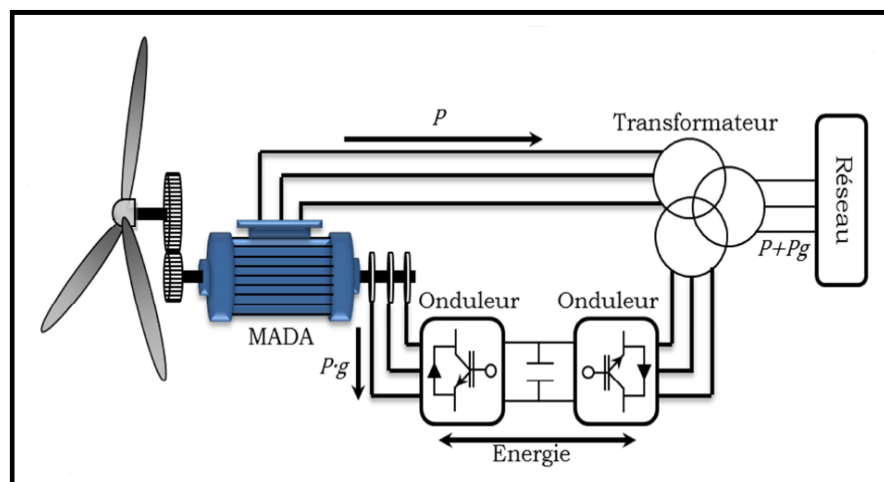


Figure 2.26 Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

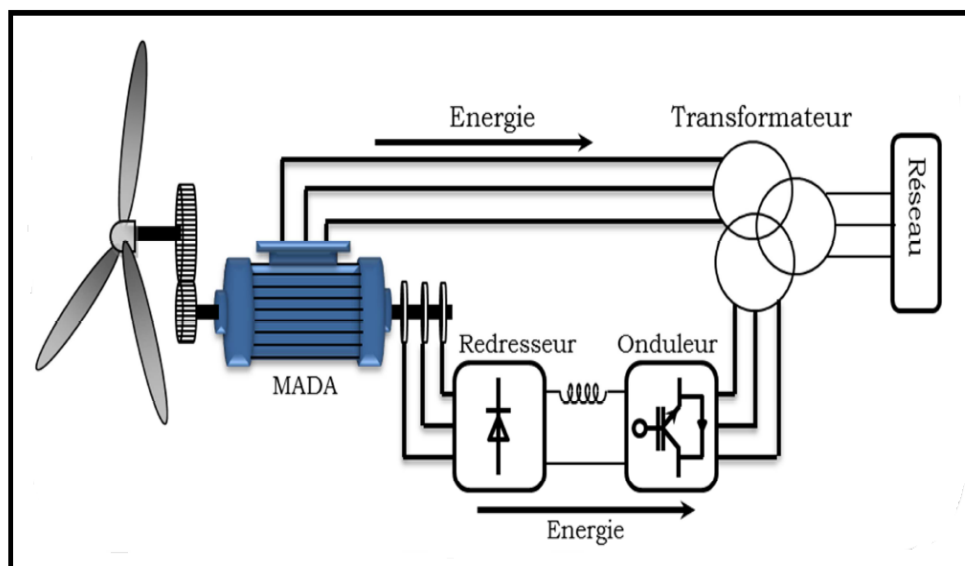
Le résumé des points forts de la MADA sont :

- sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances actives et réactives.
- elle peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- elle est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- la taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

Il existe plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

**(a) MADA – structure de Kramer**

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure 2.27, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine.



**Figure 2.27** MADA - structure Kramer

(b) MADA à énergie rotorique dissipée

La figure 2.28 représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [5].

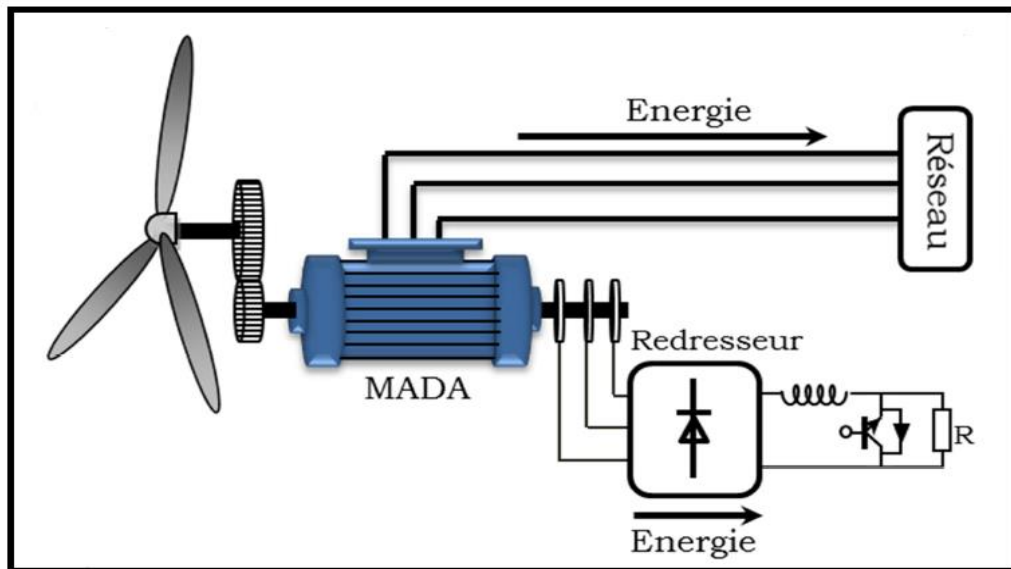


Figure 2.28 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance (figure 2.29).

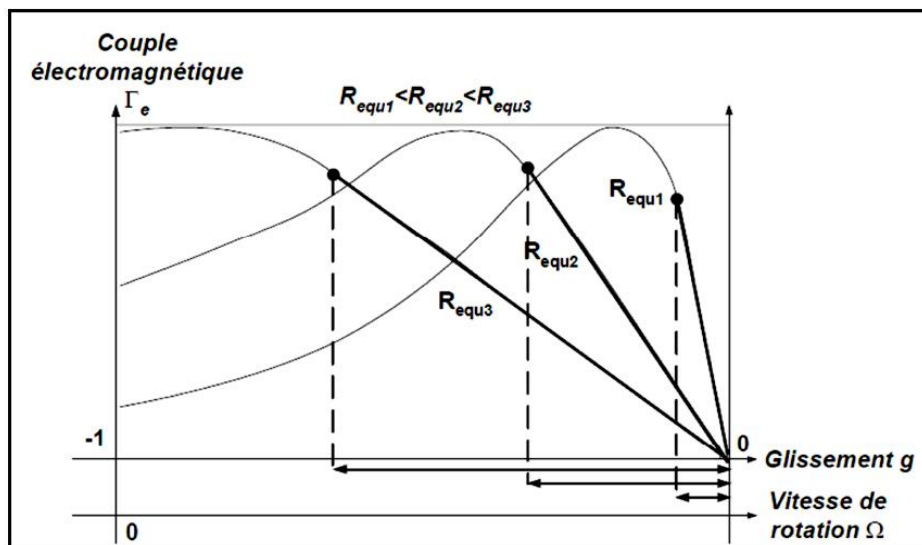


Figure 2.29 Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

(c) MADA – structure de « Scherbius » avec cycloconvertisseur

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (figure 2.30) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure 2.28.

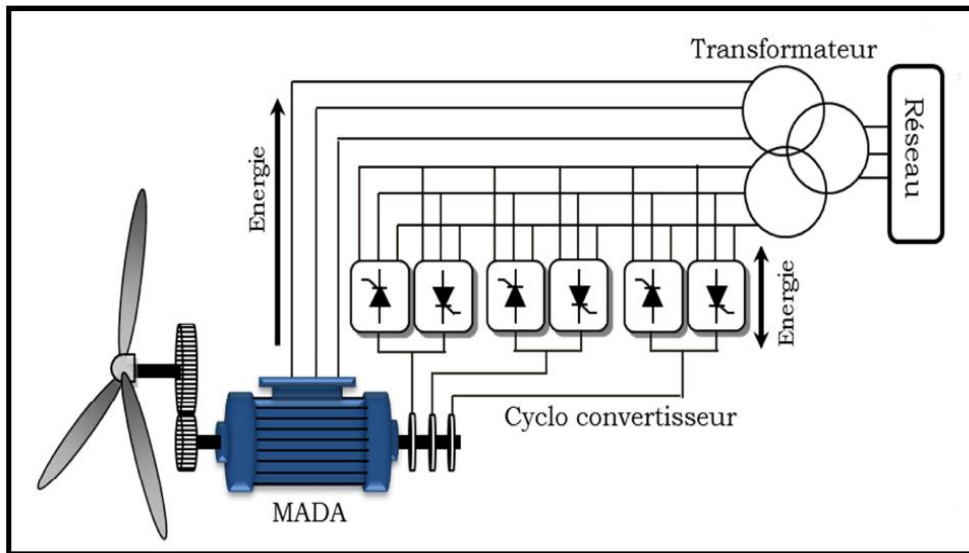


Figure 2.30 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

2.5.1.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "brushless"

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (voir figure 2.31).

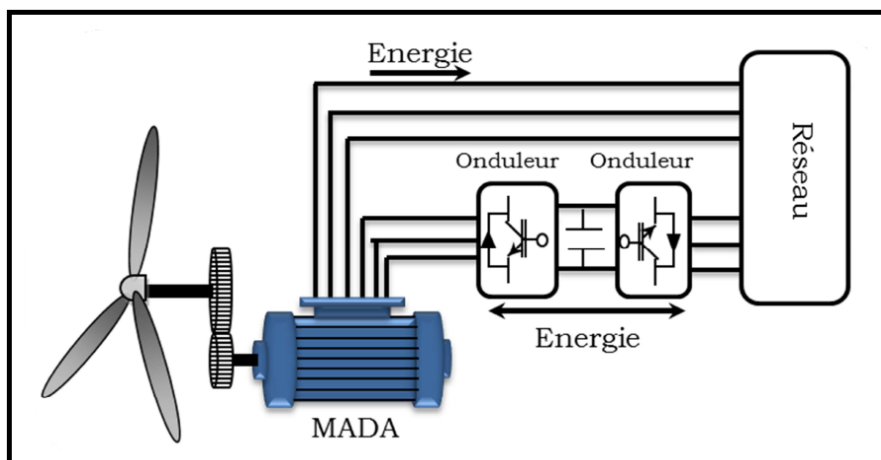


Figure 2.31 Machine asynchrone brushless connectée au réseau

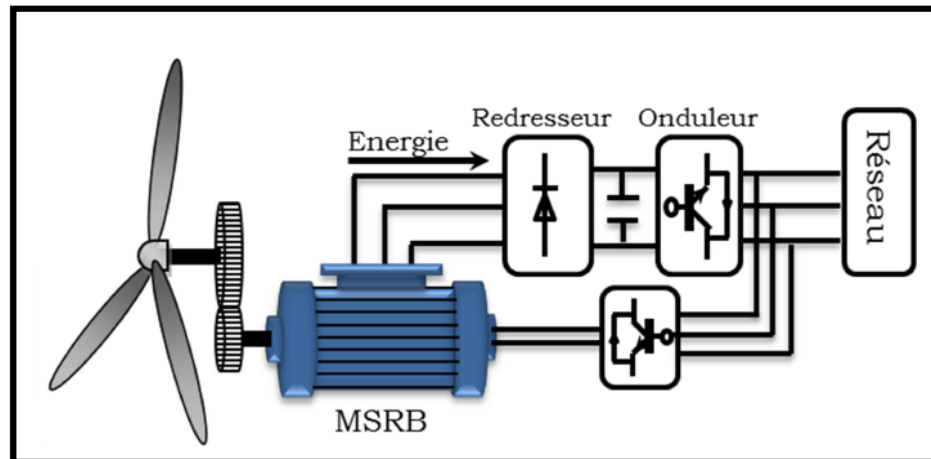
## 2.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [17].

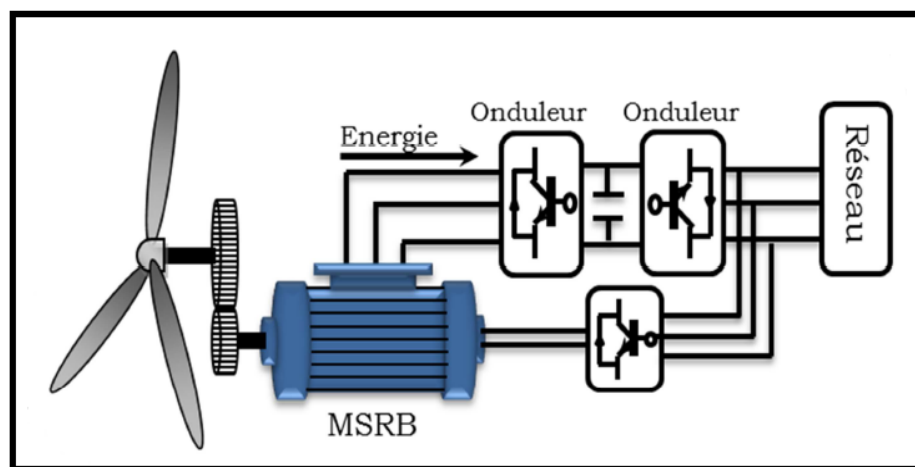
### 2.5.2.1 Générateur synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (voir Figure 2.32) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.



(a)



(b)

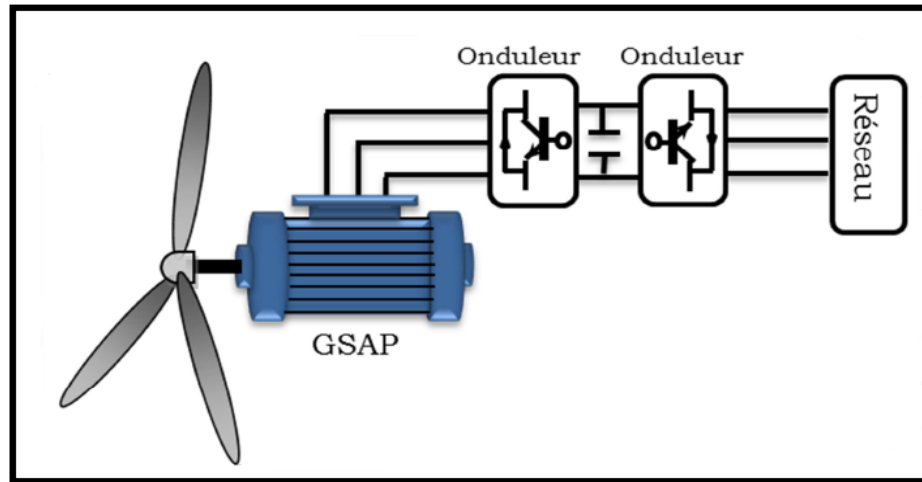
**Figure 2.32** Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commandé

### 2.5.2.2 Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

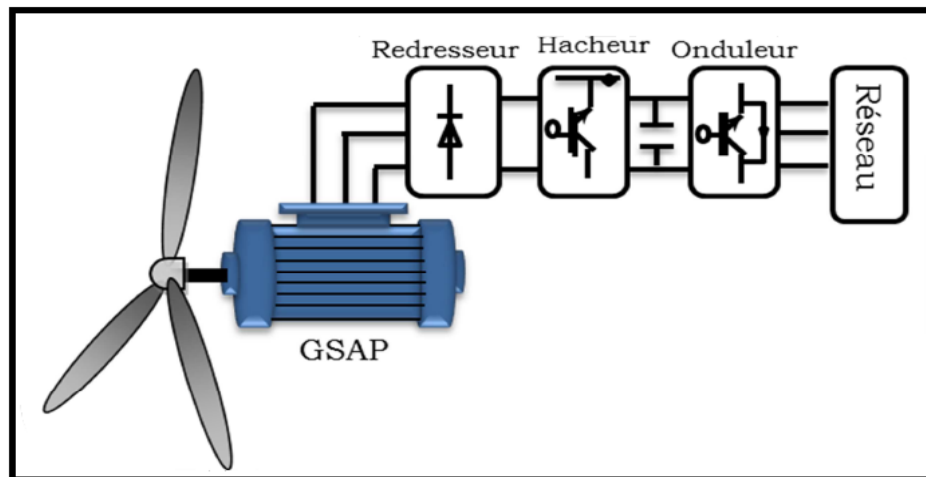
Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la

suppression de certaines sources de défauts : suppression du système de bagues et balais (figure 2.33) [18,20].



(a)



(b)

**Figure 2.33** Systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimants permanents, (a) GSAP avec convertisseurs MLI, (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI

Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

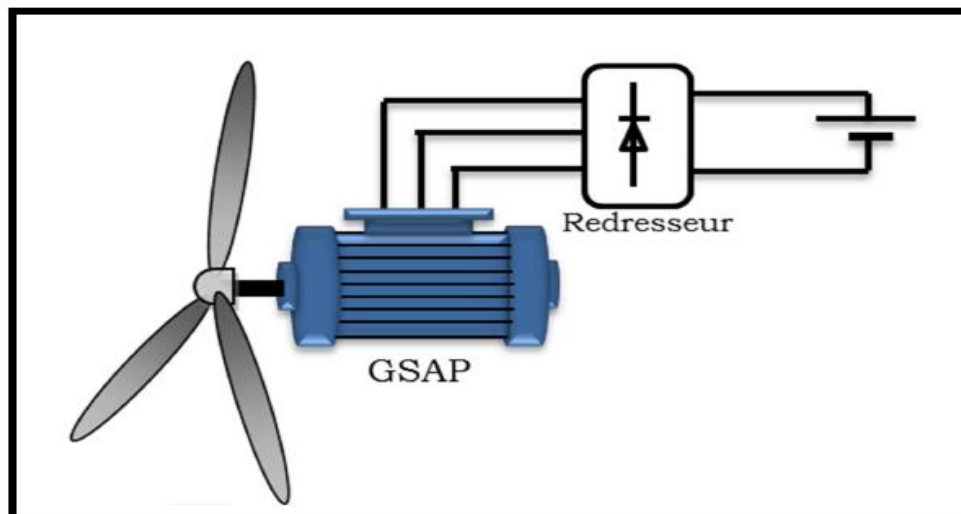
Dans la configuration de la GSAP de la figure 2.33 (b), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance.



L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50 kW).

Dans la configuration de la figure 2.33 (a), un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle, ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal [1,17].

Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et de la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la figure 2.34, un système à vitesse « non constante », coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu.



**Figure 2.34** Système éolien à coût minimum basé sur la GSAP

## 2.6 Conclusion

La production de l'énergie électrique avec les turbines éoliennes est devenue actuellement l'un des axes de recherche les plus ciblés à cause des avantages immenses qu'il apporte, surtout sur le plan économique et environnemental.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production d'énergie éolienne. Nous avons également identifié les caractéristiques principales de la turbine éolienne. Après une description succincte des différentes zones de fonctionnement, nous avons consacré une majeure partie à la modélisation du vent et celle de la turbine éolienne après avoir décrit les hypothèses simplificatrices communément introduites.

Enfin, nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées dans la conversion d'énergie éolienne. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude sur un système de production d'énergie éolienne basé sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Pour cette raison, dans le chapitre suivant, nous avons choisi de modéliser la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

# *Chapitre 3*

*Modélisation et simulation  
de la génératrice synchrone  
à aimants permanents  
(GSAP)*

### 3.1 Introduction

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type permettent de développer des couples mécaniques considérables. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrone à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression du système de bagues et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant pour les applications éoliennes. Nous allons nous focaliser ici sur la machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

### 3.2 Généralités sur les machines synchrones

#### 3.2.1 Présentation de la MSAP

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le rotor, d'où le nom de machine synchrone [17].

La machine synchrone, appelée **ALTERNATEUR** si elle fonctionne en génératrice, fournit un courant alternatif. En fonctionnement **MOTEUR** sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit. Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, souvent appelé «roue polaire», est alimenté par une source de courant continu ou équipé d'aimants permanents [20].

#### 3.2.2 Principe de fonctionnement de la machine synchrone

Une génératrice synchrone transforme de l'énergie mécanique ( $C, \Omega$ ) en énergie électrique ( $V, I$  de fréquence  $f$ ). Un aimant tourne à la fréquence  $N$ , la spire est traversée par un flux variable  $\mathcal{A}(t)$  d'où la création d'une f.e.m. induite  $e(t) = -d\mathcal{A}/dt$ . La fréquence de cette f.e.m. est telle que :  $f = p N$ , soit  $\Omega = p \omega$  avec  $\Omega$  la vitesse de rotation du rotor (aimant),  $p$  le nombre de paires de pôles et  $\omega$  la pulsation de la f.e.m. sinusoidale induite, en rad/s.

### 3.2.3 Classification des machines synchrones

En reprenant le principe de la classification de Chalmers et de ces collègues [21], on peut agencer l'ensemble des machines synchrones comme indiqué figure 3.1. Les machines sont distinguées par la nature de leur excitation (bobinages, aimants permanents...) et par leur rapport de saillance :  $\xi = \frac{L_q}{L_d}$

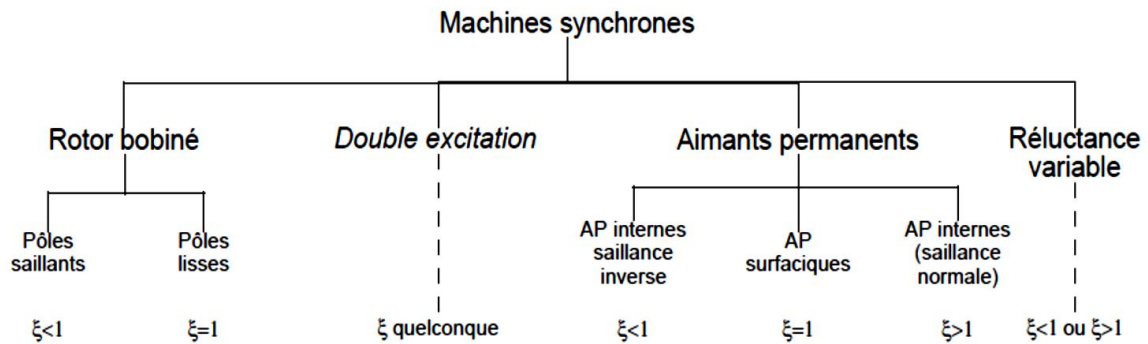


Figure 3.1 Classification des machines synchrones

### 3.3 Constitution de la machine synchrone

La machine synchrone possède deux parties principales :

- l'inducteur porté le plus souvent par le rotor.
- l'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs.

#### - Le stator

Il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de  $120^\circ$  électriques.

#### - Le rotor

Il se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique.

### a) Rotor à pôles saillants

C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine [20,21].

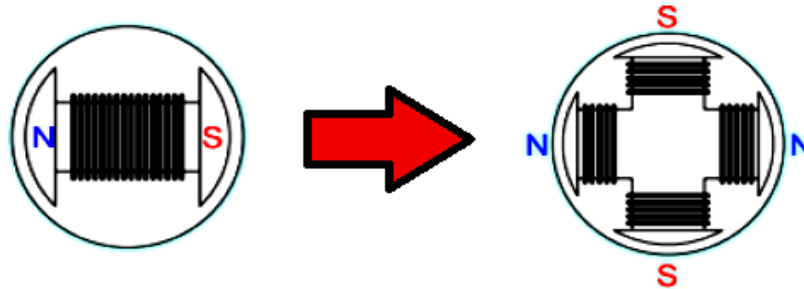


Figure 3.2 Rotor à pôles saillants

### a) Rotor à pôles lisses

Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent deux pôles.

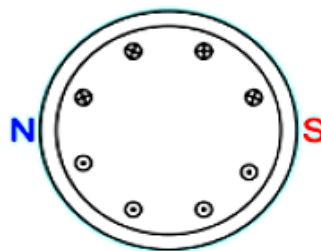


Figure 3.3 Rotor à pôles lisses

## 3.4 Machine synchrone à aimants permanents

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type alnico, samarium cobalt, néodyme fer bore...), leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines [17].

Dans la machine à aimants permanents (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La machine synchrone à aimants permanents est

utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique...etc. L'étude de cette machine, nous oblige à la mettre sous forme d'un modèle mathématique regroupant tous ces paramètres (résistance, inductance...), permettant ainsi de mettre en évidence certains phénomènes apparaissant lors de son fonctionnement. En outre, ce modèle nous apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques qui interviennent au cours des applications [20,22].

### 3.4.1 Principaux matériaux utilisés dans les machines électriques

Les performances des machines électriques sont fortement liées aux caractéristiques des matériaux utilisés. L'évolution de ces matériaux, notamment les aimants permanents et les matériaux ferromagnétiques, a contribué à l'amélioration des performances des machines électriques [23,24].

### 3.4.2 Aimants permanents

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan  $B-H$  (figure 3.4). Cette courbe est caractérisée par :

- l'induction rémanente  $B_r$
- le champ coercitif  $H_{cB}$ , qui est le champ démagnétisant annulant l'induction ; plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable
- le produit d'énergie volumique  $(BH)_{\max}$
- les valeurs  $B_m$  et  $H_m$  du point de fonctionnement optimal  $M$  correspondant à  $(BH)_{\max}$ .
- l'aimantation  $H_{cJ}$ , champ coercitif qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau.

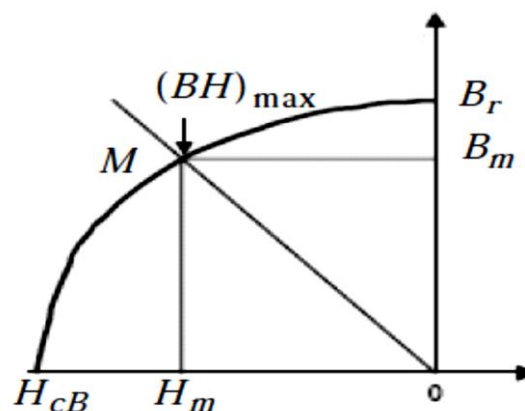


Figure 3.4 Illustration d'une courbe  $B-H$  pour les aimants [23]

### 3.4.3 Matériaux pour aimants

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

- aimants « rigides » ou durs : bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires.
- aimants « peu rigides » : leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes que celles des aimants rigides.

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants (figure 3.5) [24]:

1. **Les alnicos**: sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen.
2. **Les ferrites** : sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum. Leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. Leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.
3. **Les composés de cobalt et de terres rares comme le samarium** : ces matériaux ont d'excellentes performances techniques. Leur champ rémanent et leur excitation coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important [25].

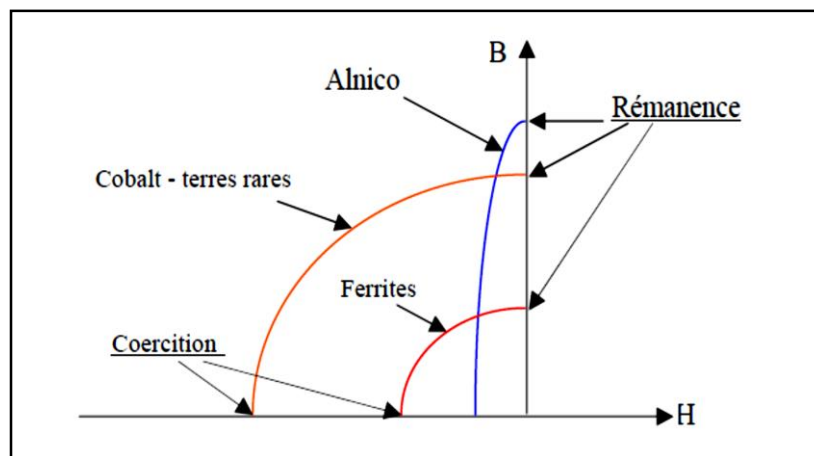


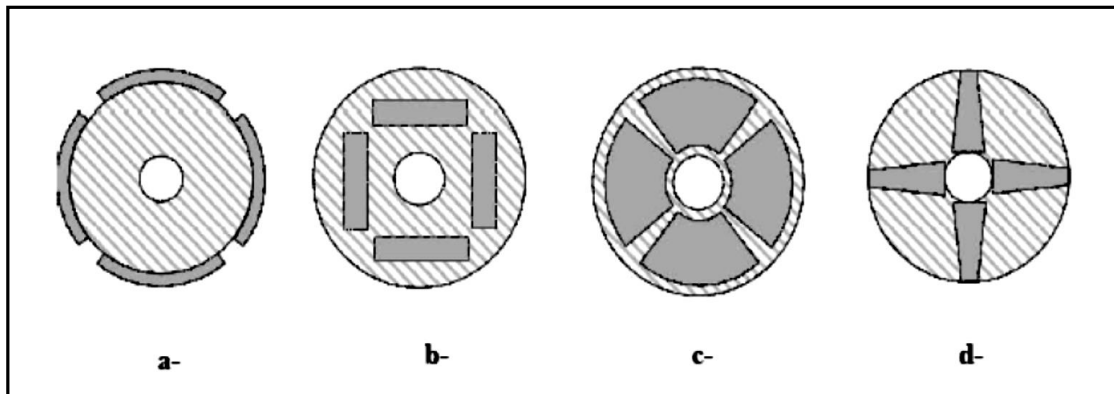
Figure 3.5 Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux [17]

### 3.4.4 Emplacement des aimants

Différentes configurations d'emplacement des aimants sont possibles (voir figure 3.6). Chacune a ses avantages et ses inconvénients. En règle générale, les aimants en surface ont



l'avantage d'être simples à mettre en place (un simple collage sur la surface du rotor suffit). À haute vitesse, cette configuration n'est pas adaptée car avec la force centrifuge, les aimants vont se décoller. Pour remédier à ce problème, il est préconisé de recourir soit à un rotor extérieur avec aimants en surface (les aimants étant plaqués à la surface grâce à la force centrifuge) soit à frotter les aimants. En plus de supprimer les problèmes de décollement à haute vitesse, les aimants enterrés peuvent être utilisés en concentration de flux. Ainsi, leur utilisation est optimisée. À noter qu'en plaçant les aimants de cette manière, les courants de Foucault dans les aimants sont diminués [26].



**Figure 3.6** Quelques configurations de placement des aimants

Aujourd'hui, la plupart des machines synchrones utilisées dans l'éolien sont des machines synchrones à aimants permanents (MSAP).

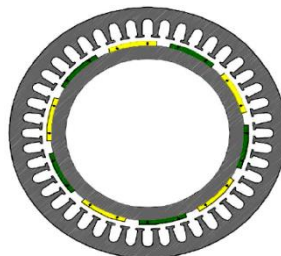
### 3.4.5 Différentes types de machines synchrones à aimants

#### 3.4.5.1 Machines synchrones à flux radial

Plusieurs MSAP à flux radial ont été proposées dans la littérature. La plupart sont à rotor intérieur mais certaines ont un rotor extérieur.

Ce type de machine permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation [23].

La figure 3.7 montre une MSAP classique à flux radial et à rotor intérieur.



**Figure 3.7** MSAP à flux radial

3.4.5.2 Machines synchrones à flux axial

Ces machines (figures 3.8 et 3.9) ont fait l’objet de plusieurs études dans le cadre d’une application éolienne à attaque directe [23,27].

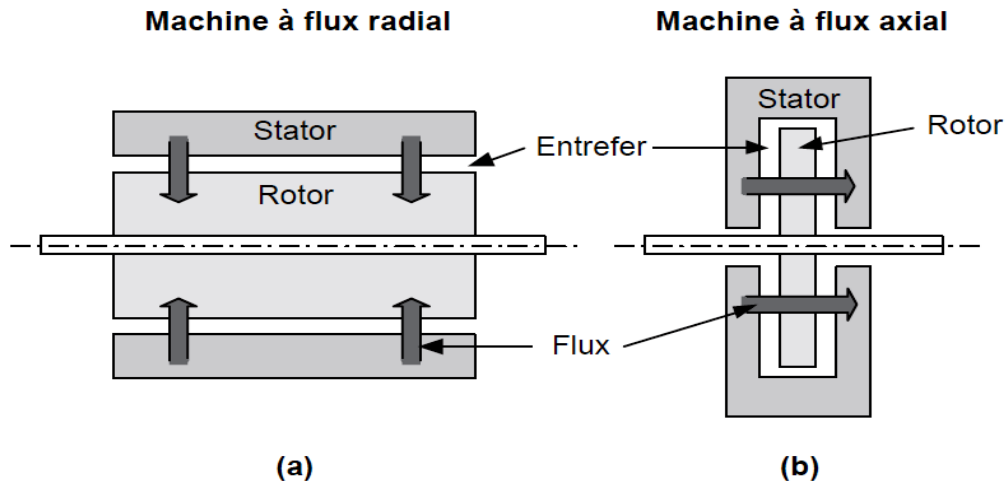


Figure 3.8 Machines à flux radial (a) et axial (b)

La figure 3.9 représente la machine synchrone à flux axial :

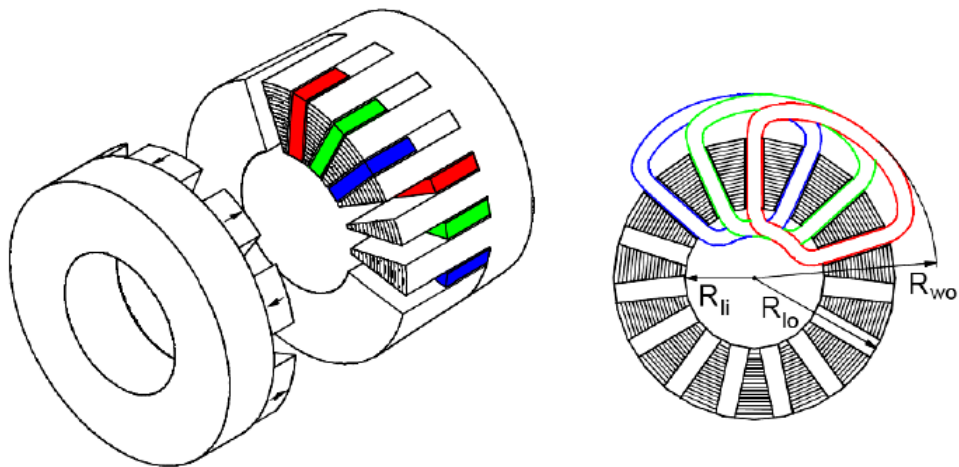


Figure 3.9 Machine synchrone à flux axial

Pour une machine axialement courte, le volume d’entrefer et donc le couple produit est plus important pour une machine à flux axial que pour une machine à flux radial.

$$\begin{cases} C_{radial} \propto R_{ext} L_m \\ C_{axial} \propto \frac{R_{ext}^2 - R_{int}^2}{2} \end{cases} \quad (2.38)$$

avec :

$L_m$  : longueur de la machine

$R_{ext}$  : rayon externe de la machine

$R_{int}$  : rayon interne du rotor (machine axiale)

Pour les applications basses vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse. Ceci conduit à un meilleur couple volumique pour la machine à flux axial.

### 3.4.5.3 Machine synchrone à flux transverse

La machine à flux transverse est une technologie nouvelle et intéressante. Il existe plusieurs topologies mais la plus pertinente utilise des aimants permanents avec concentration du flux. Cette dernière semble bien adaptée à la vitesse variable de l'entraînement direct mais elle a été étudiée surtout en moteur [23].

## 3.5 Avantages et inconvénients de la MSAP

### 3.5.1 Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines [23,28]:

- puissances massiques importantes et élevées
- absence de contacts glissants
- pas des pertes résistives au rotor, ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression des équipements de refroidissement au rotor
- suppression des bagues et des balais, ce qui réduit les problèmes de maintenance
- possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage
- grande fiabilité
- fonctionnement en survitesse

### 3.5.2 Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP, citons :

- coût élevé des aimants
- interaction magnétique due au changement de structure
- influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine
- diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps

### 3.6 Les domaines d'application de la MSAP

C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drivers),
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraises dentaires),
- les servomoteurs,
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous marins,
- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolienne.

### 3.7 Modèle de la MSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses simplificatrices [29,30]:

- l'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- la distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- l'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- l'effet d'encochage est négligeable.
- la résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

#### 3.7.1 Equations électriques de la machine

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$[V_a \ V_b \ V_c]^t$  : vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$  : vecteur courant de phases statoriques.

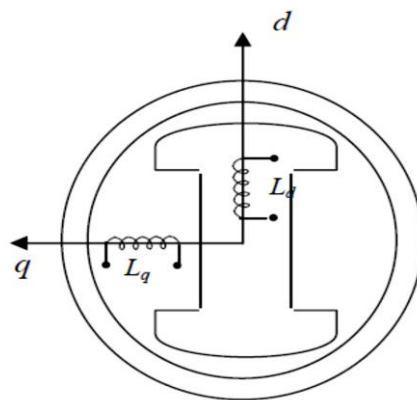
$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$  : vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$R_s$  : résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [30]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

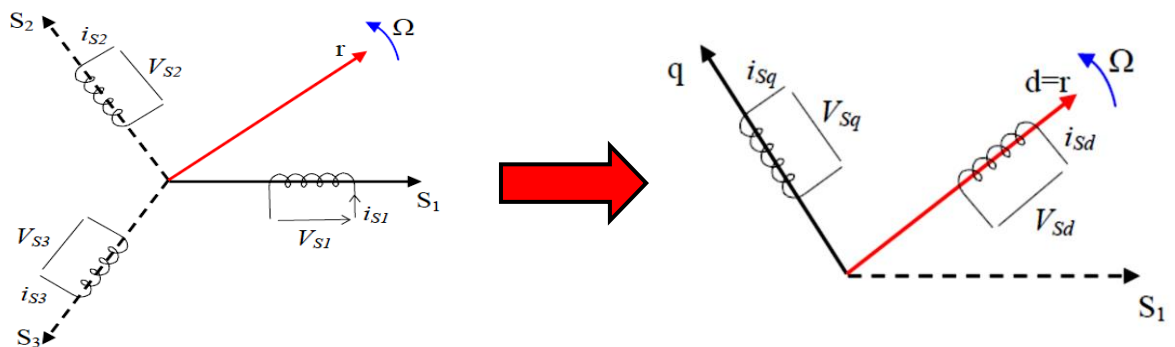
**- Passage au repère de Park**

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor (figure 3.10).



**Figure 3.10** Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park [17]

Les deux bobines  $d$  et  $q$ , tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère ( $d,q$ ) nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [29,30].



**Figure 3.11** Passage de repère naturel du stator au repère (d,q) de Park

En appliquant la transformation de Concordia  $T_{32}$  définit par :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ avec : } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La variable  $x$  peut être  $V$ ,  $i$  ou  $\varphi$ .

On obtient :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_\alpha \\ \varphi_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (3.3), on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor. Si  $\theta$  est l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator, nous avons :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} + \dot{\theta} P \left( \frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\text{où : } \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(-\theta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$V_d$ ,  $V_q$ ,  $i_d$  et  $i_q$  sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant.

$\varphi_d$  et  $\varphi_q$  sont les composantes directe et en quadrature du flux.

### 3.7.2 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\varphi_d$  et  $\varphi_q$  sont fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$  [31]:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3.6)$$

$L_d$  et  $L_q$  sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de  $\theta$ .  $\varphi_f$  représente le flux des aimants. En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (3.4), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega P \left( \frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

où  $\omega = p\Omega$ ,  $p$  étant le nombre de paires de pôles et  $\Omega$  la vitesse angulaire du rotor.

$e_d$  et  $e_q$  sont les composantes directe et en quadrature de la f.e.m. données par :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\varphi_f\Omega \end{cases} \quad (3.8)$$

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit [32]:

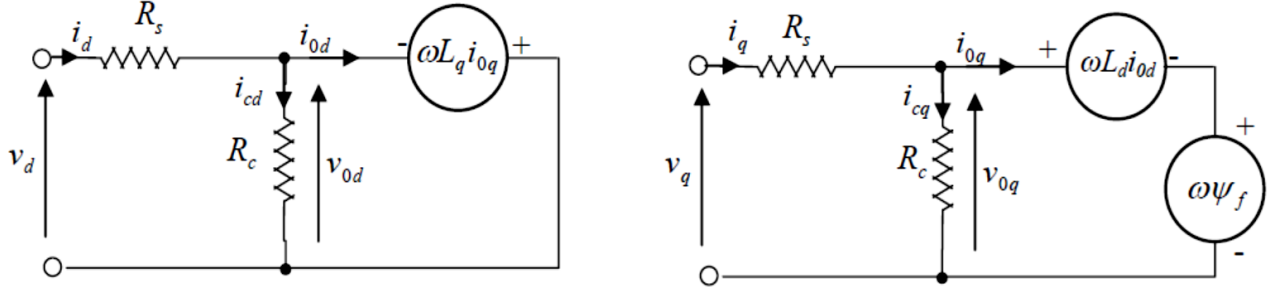


Figure 3.12 Circuit équivalent de MSAP (convention moteur)

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans les repères de Park (figure 3.13), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [33,34]:

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (3.9)$$

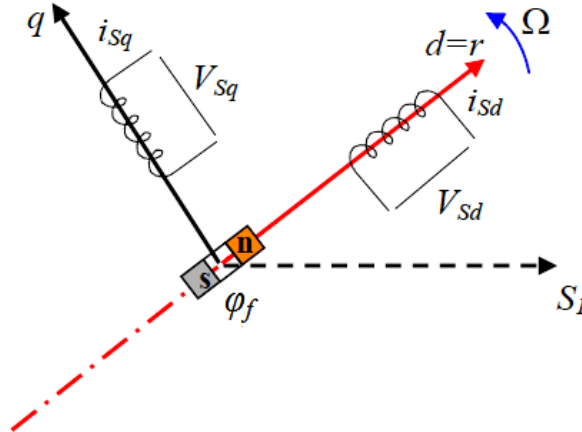


Figure 3.13 Modèle de PARK pour la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)

### 3.7.3 Equations du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle du stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [29]:

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (3.10)$$

$W_e$ : énergie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$ : écart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

$P$ : nombre de paires de pôles.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par [32]:

$$P(t) = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (3.11)$$

En remplaçant  $V_d, V_q$  par leurs expressions, on a :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[ -R_s(i_d^2 - i_q^2) - \left( i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right] \quad (3.12)$$

Les termes :

$\frac{3}{2} [-R_s(i_d^2 - i_q^2)]$  : représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \left[ i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right]$  : représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator [35,36].

$\frac{3}{2} \left[ \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right]$  : représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P\Omega = \omega \text{ et } P_e = C_{em} \cdot \Omega \quad (3.13)$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (3.14)$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [29]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (3.15)$$

### 3.7.4 Equations mécaniques

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante [29,32]:

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.16)$$



avec :

$C_m$  : couple moteur appliqué sur la génératrice.

$\Omega_f$  : couple de frottement.

$J$  : moment d'inertie total de la machine.

$f$  : coefficient de frottement visqueux.

### 3.8 Modes de fonctionnement

#### 3.8.1 Fonctionnement à vide du GSAP

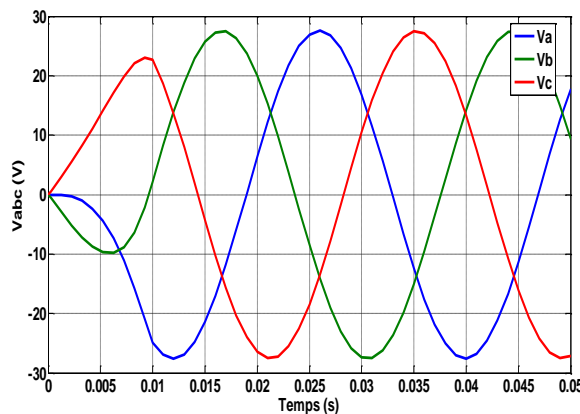
Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

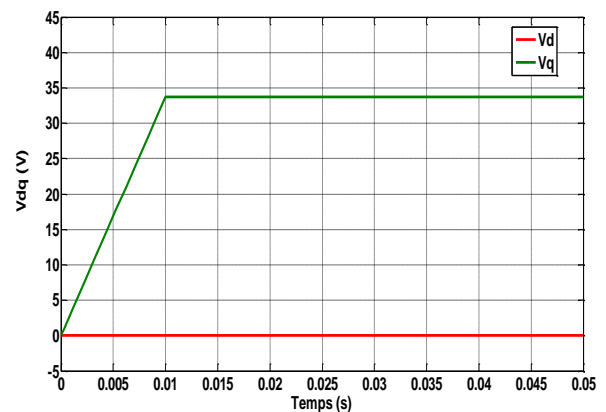
Les expressions des tensions et celle du couple deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

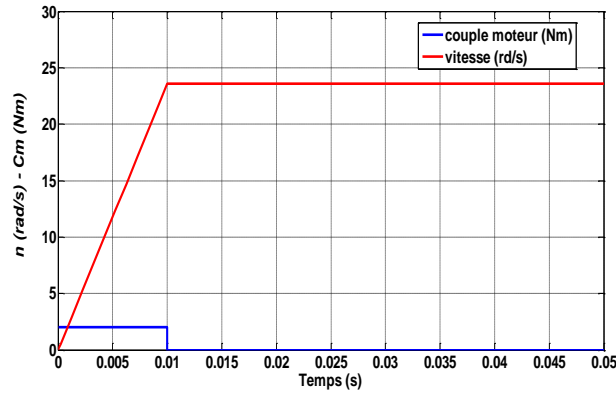
On lance la génératrice à l'aide d'un couple moteur égal à 2 N.m pour une durée de 10 ms puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate d'après la figure 3.14 que la vitesse se stabilise à une valeur de 23,56 rad/s. Les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable avec une valeur crête de 27,5 V et une fréquence de 50 Hz.



**a:** Tensions statoriques



**b:** Composantes  $V_d$  et  $V_q$



c: vitesse de rotation et couple moteur

Figure 3.14 Simulation de la GSAP à vide

Tableau 3.1 Paramètre de la génératrice GSAP à vide

	Désignations	Valeur	Unité
Rs	Résistance statorique	1,137	Ω
Ld	Inductance statorique selon l'axe d	0,0027	H
Lq	Inductance statorique selon l'axe q	0,0027	H
φ	Flux des aimants permanents	0,15	Wb
f	Coefficient de frottement	0	Nm/rd/s
J	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	0,0016	kg.m <sup>2</sup>
P	Nombre de pôles	18	-

### 3.8.2 Fonctionnement en charge du GSAP

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ). Pour obtenir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions données par (3.9) [17] :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \varphi_f \end{cases}$$

D'autre part, l'application des tensions  $V_d$  et  $V_q$  sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} I_d + L_{ch} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{ch} I_q \\ V_q = R_{ch} I_q + L_{ch} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{ch} I_d \end{cases} \quad (3.19)$$

En remplaçant les expressions de  $V_d$  et  $V_q$  dans (3.19), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})I_d - (L_d + L_{ch})\frac{d}{dt}I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})I_q - (L_q + L_{ch})\frac{d}{dt}I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega\varphi_f \end{cases} \quad (3.20)$$

En appliquant la transformée de Laplace aux équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q] \\ SI_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega\varphi_f] \end{cases} \quad (3.21)$$

Considérons le flux d'excitation  $\varphi_f$  comme grandeur de commande, et les courants  $I_d$ ,  $I_q$  comme variables d'état [22,29].

### 3.8.2.1 Equations d'état

On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équations d'état:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][V] \quad (3.22)$$

$$[X] = [i_d \quad i_q]^t, \quad [V] = [0 \quad \varphi_f] \quad (3.23)$$

Les équations (3.21) peuvent s'écrire sous la forme matricielle (3.24).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega\varphi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

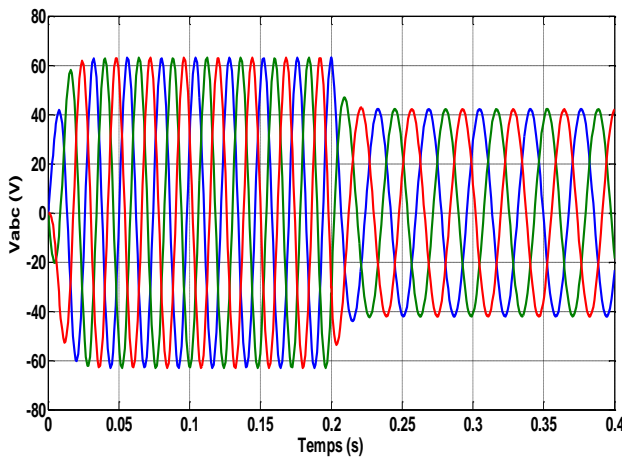
$$[A] = [A_1] + \omega[A_2];$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

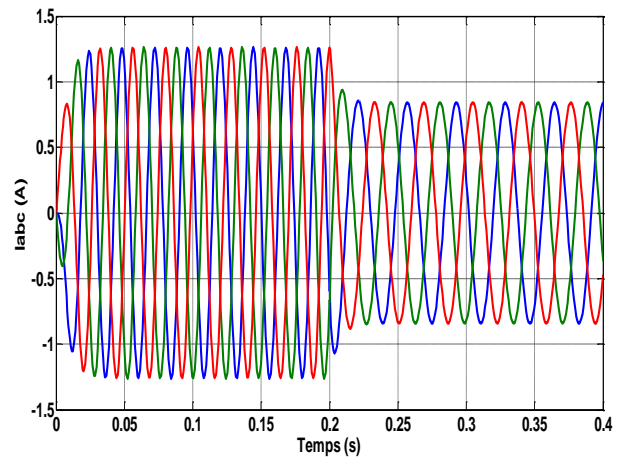
$$[B][V] = \omega \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.8.2.2 Résultats de simulation de la GSAP en charge

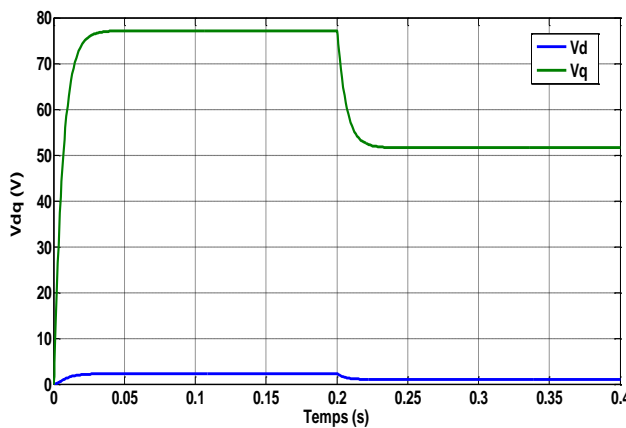
Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (figure 3.15e). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions  $V_{abc}$  et courants  $I_{abc}$  représentés sur les figures 3.15a et 3.15b. Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6,28 N.m à 4,2 N.m, la vitesse mécanique varie de 261 tr/min jusqu'à 175 tr/min. La tension et le courant diminuent respectivement de 63 V à 42,1 V et de 1,26 A à 0,84 A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.



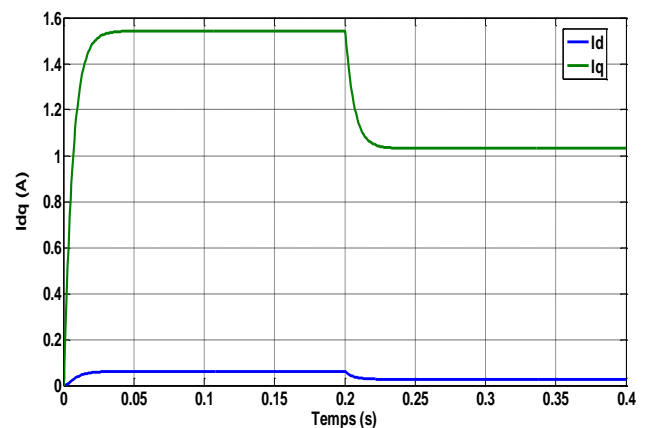
a : Tensions statoriques  $V_{abc}$



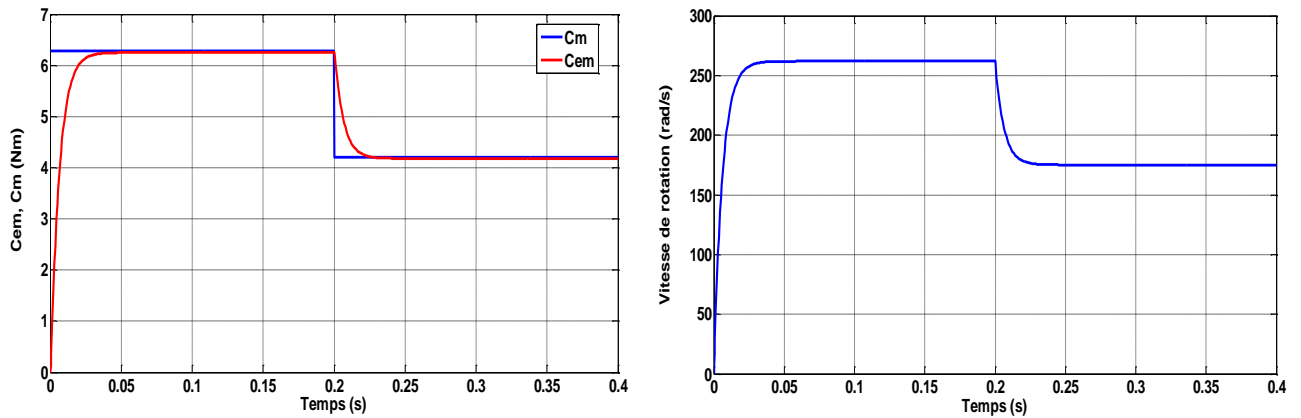
b : Courants statoriques  $I_{abc}$



c : Composantes  $V_d$  ;  $V_q$



d : Composantes  $I_d$  ;  $I_q$



$e$  : Couples électromagnétique et moteur

$f$  : Vitesse de rotation

Figure 3.15 Simulation de la GSAP sur une charge

Tableau 3.2 Paramètre de la génératrice GSAP en charge

	Désignations	Valeur	Unité
$R_s$	Résistance statorique	0,895	$\Omega$
$R_{ch}$	Résistance de charge	50	$\Omega$
$L_d$	Inductance statorique selon l'axe d	0,012	H
$L_q$	Inductance statorique selon l'axe q	0,0211	H
$L_{ch}$	Inductance de charge	0,002	H
$\phi_f$	Flux des aimants permanents	0,9	Wb
$f$	Coefficient de frottement	0,001	Nm/rd/s
$J$	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	0,00141	kg.m <sup>2</sup>
$P$	Nombre de pôles	3	-
A1	$[(R_s+R_{ch}) / (L_d+L_{ch}) \ 0; \ 0 \ (R_s+R_{ch}) / (L_q+L_{ch})];$		
A2	$[0 \ (L_q+L_{ch}) / (L_d+L_{ch}); \ -(L_d+L_{ch}) / (L_q+L_{ch}) \ 0];$		
B	$[0; \ \Phi_f / (L_q+L_{ch})];$		

### 3.9 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents sous l'environnement Matlab/*Simulink*. Après avoir présenté les types d'aimants permanents, les caractéristiques des matériaux utilisés, la description de la machine synchrone à aimants permanents et les différentes structures rencontrées, nous avons établi en premier lieu les différentes équations de la machine électrique triphasée dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents qui sera utilisé également par la suite. Ce modèle a été validé par les résultats de simulation conformes pour un fonctionnement de la génératrice à vide et avec une charge. Ces résultats montrent que la puissance mécanique fournie, la vitesse et la charge ont une influence directe sur les courants et les tensions de la machine.

Après la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec la turbine dans la chaîne globale de l'énergie éolienne, le cas où est la génératrice est connectée avec la charge par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance est abordé dans le chapitre qui suit.

# *Chapitre 4*

*Qualité de l'énergie  
électrique fournie par un  
système éolien*

## 4.1 Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Les paramètres caractéristiques de ce réseau sont la fréquence, l'amplitude, la symétrie du système triphasé et la forme d'onde de la tension. Cette dernière doit être sinusoïdale. Cependant, lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau électrique.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers [45].

Depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance, les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux électriques. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement.

Ce chapitre propose alors dans un premier temps un développement de cette problématique et en particulier des contraintes liées au raccordement des éoliennes avec la charge. Ainsi, nous allons analyser les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de l'énergie et les solutions possibles pour en minimiser les effets. Les normes internationales sur la qualité de l'énergie seront aussi discutées. Des résultats de simulation sont présentés sous l'environnement Matlab/*Simulink*, notamment ceux de l'énergie délivrée en sortie.

## 4.2 Paramètres de la qualité de l'énergie produite

La qualité de l'énergie devient une des priorités majeures qui concernent tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, consommateur ou producteurs. Pratiquement, la totalité des équipements électriques exigent une énergie électrique de bonne



qualité. Durant ces dernières années, le nombre de systèmes alimentés électroniquement est en forte progression. Cet essor est motivé par l'amélioration des performances des systèmes électroniques. Différents secteurs sont concernés [46]:

- industriel (variateurs de vitesse, alimentation à découpage, etc.) ;
- tertiaire (informatique, ballast des tubes fluorescents... ) ;
- domestiques (téléviseurs, appareil électroménagers) ;

La qualité de l'énergie produite est un vaste concept qui recouvre à la fois la continuité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Les facteurs qui sont susceptibles d'affecter la qualité de l'énergie électrique sont :

- la variation de fréquence ;
- les fluctuations de tension ;
- les creux de tension ;
- les courants ou tensions harmoniques ;
- le déséquilibre.

Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation.

### 4.2.1 Creux et coupures de tension

Le **creux de tension** est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale [47] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux d'utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une **coupure de tension** quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure 4.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [48,49].

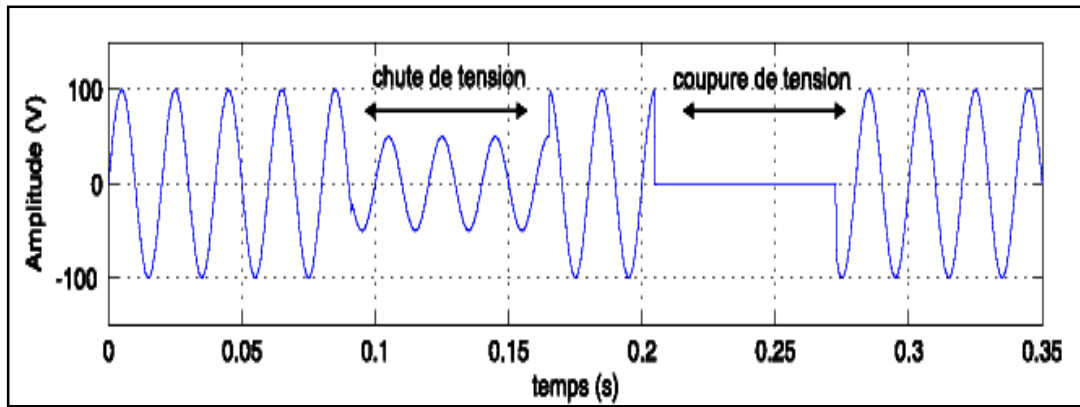


Figure 4.1 Creux et coupures de tension

### 4.2.2 Fluctuations de tension

Les **fluctuations de tension** sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [48,50].

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appels importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure 4.2.

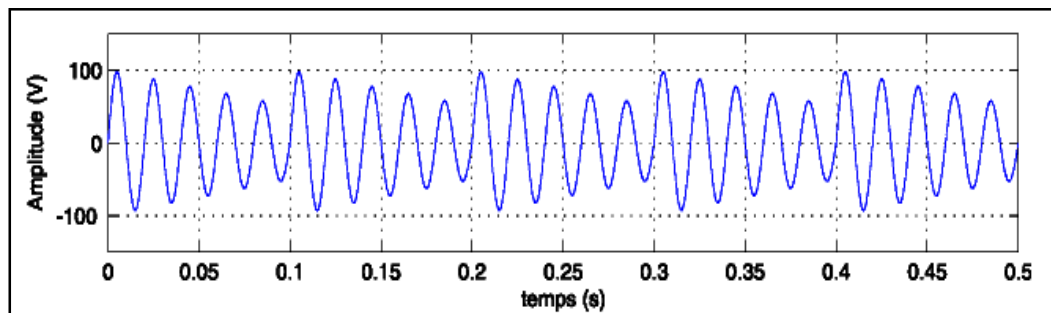


Figure 4.2 Fluctuations de tension

### 4.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de **déséquilibre du système triphasé** comme le montre la figure 4.3.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [51].

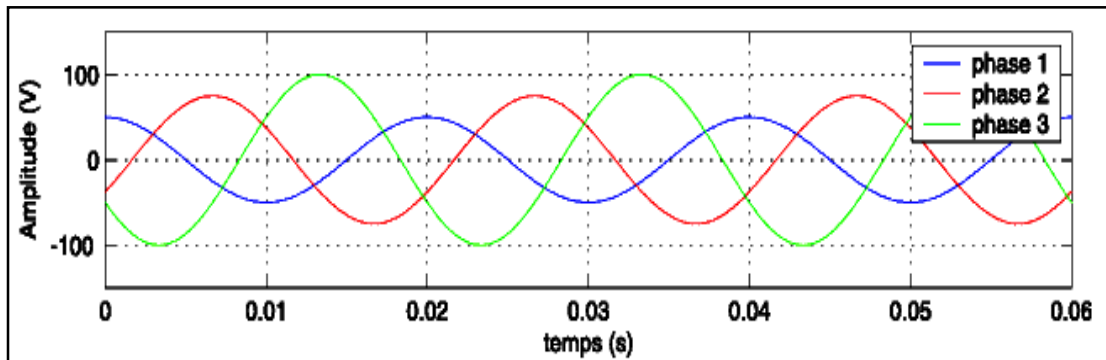


Figure 4.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

#### 4.2.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source autonome, comme le montre la figure 4.4. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ .

Avec l'augmentation des fermes éoliennes connectées sur le réseau HT, les variations de puissances pourraient causer des variations de fréquence. En effet, les variations de puissances produites par les éoliennes peuvent atteindre quelques centaines de kW en quelques dizaines de seconde [52].

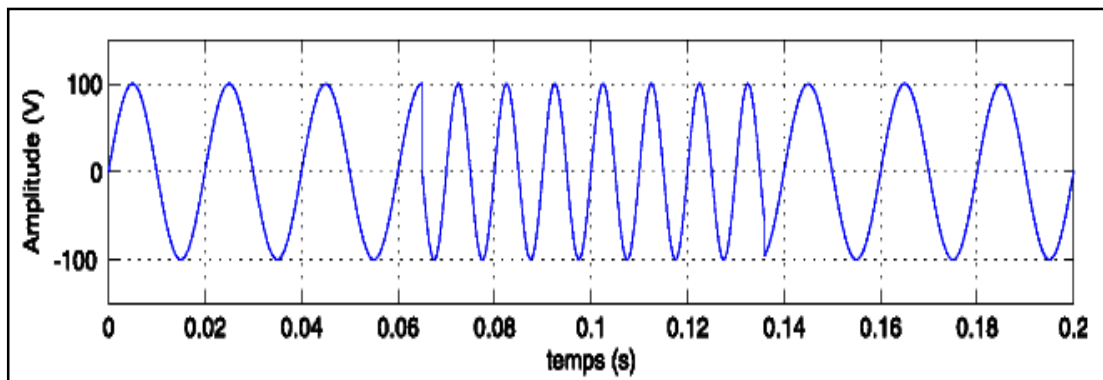


Figure 4.4 Variation de fréquence

### 4.2.5 Harmoniques et interharmoniques

Les **harmoniques** sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental [53]. La figure 4.5 montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est la prolifération des équipements de l'électronique de puissance à base de composants électroniques comme : les thyristors, les transistors etc....

Les **interharmoniques** sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entières de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en accroissement et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique [54,55].

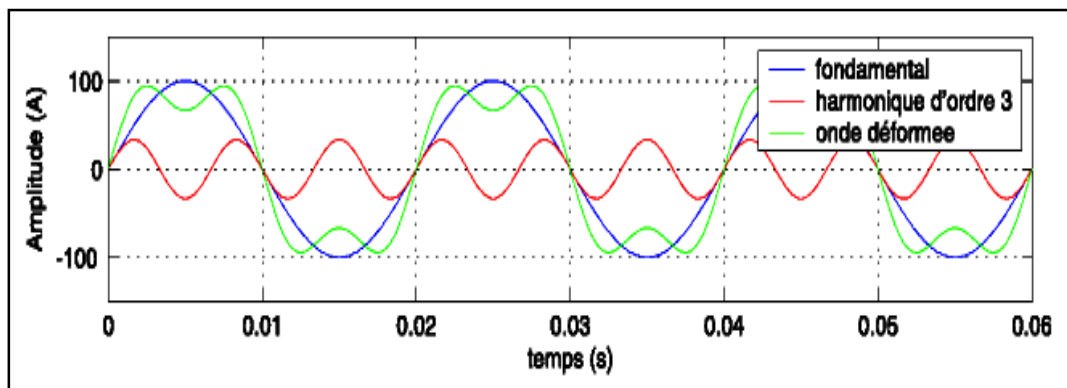


Figure 4.5 Les harmoniques

Les pollutions harmoniques seront traitées dans ce chapitre lors du raccordement de notre système éolien avec la charge électrique.

### 4.3 Définition des harmoniques

Dans le système de puissance [56], la définition d'un harmonique peut être énoncée comme suit : une composante sinusoïdale périodique ayant une fréquence multiple entière de la fréquence du fondamental. Ainsi, pour un système, la fréquence fondamentale est de  $f_0$  et la fréquence de la  $h^{\text{ème}}$  harmonique est de  $hf_0$ . Les harmoniques sont souvent utilisées pour définir la distorsion du signal sinusoïdal associée avec le courant ou la tension de différentes amplitudes et de fréquences, ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance [53,57].

## 4.4 Interprétation des harmoniques

Le concept d'harmonique est introduit au début du 19<sup>ème</sup> siècle par **JOSEPH FOURIER** qui démontra que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série de sinusoides de fréquences discrètes (multiples) [58].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (4.1)$$

On note que la composante  $\frac{a_0}{2}$  de la série de **FOURIER** est la composante continue.

$a_0, a_n, b_n$  sont définis comme suit :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (4.4)$$

Le courant absorbé par la charge non linéaire a pour expression :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(\omega_h t + \varphi_h) \quad (4.5)$$

La première composante de rang 1 ( $h = 1$ ) est appelée : composante fondamentale. Pour les systèmes raccordés à un réseau électrique stabilisé, la fréquence de la composante fondamentale est considérée comme étant fixe (50 Hz en Europe, 60 Hz aux États-Unis). Le reste des composantes de la série de **FOURIER** sont appelées : harmoniques de rang  $h$ , où  $h$  désigne le numéro de la composante (le rang 2 correspond au deuxième terme de la série de **FOURIER** qui aura une fréquence double du fondamental). La figure 4.6 donne l'allure d'un courant contenant un harmonique de rang 3, c'est-à-dire un courant qui contient une composante de rang 3 élevée en amplitude. Dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont de rangs 5, 7, 11 et 13 [54,56].

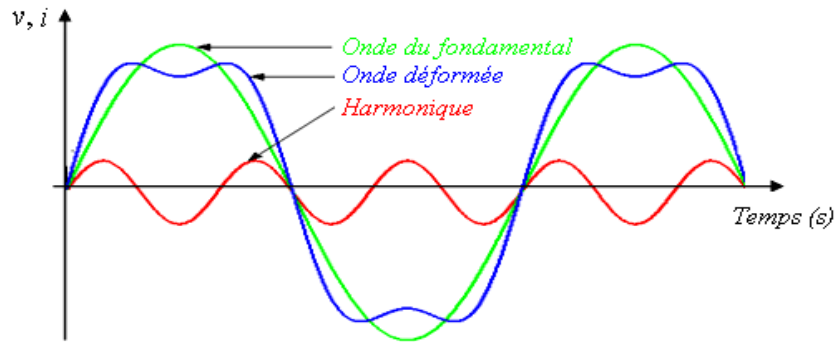


Figure 4.6 Représentation d'un harmonique

## 4.5 Sources des harmoniques et leurs effets

### 4.5.1 Sources des harmoniques

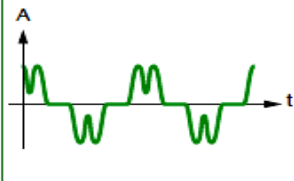
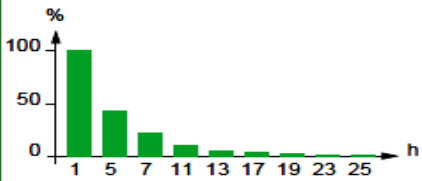
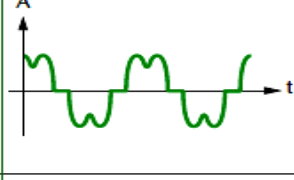
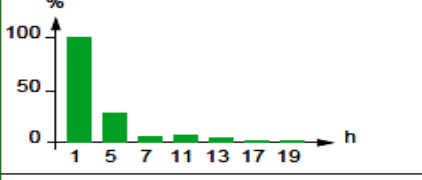

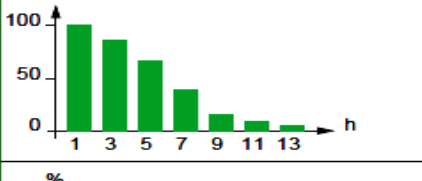
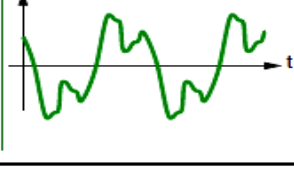
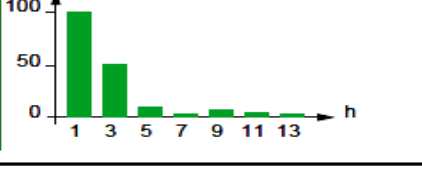
Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale [59].

On représente quelques principales charges non linéaires situées dans les réseaux électriques, comme par exemple:

- gradateur monophasé.
- redresseur triphasé à thyristor.
- moteur asynchrone.

Le tableau 4.1 montre quelques charges non linéaires citées ci-dessus [55]:

**Tableau 4.1** Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre
Variateur de vitesse		
Redresseur / chargeur		
Charge informatique		
Eclairage fluorescent		

### 4.5.2 Effets des harmoniques

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme :

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce

cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

- La dégradation de la précision des appareils de mesure.
- Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment [60].

## 4.6 Mesures et prévention des harmoniques

### 4.6.1 Mesures des harmoniques

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, *Total Harmonic Distortion*, **THD**) qui est le plus couramment utilisé [53,56].

L'équation (4.6) peut être écrite sous la forme suivante :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad (4.6)$$

avec :

$I_1$  : valeur efficace du courant du fondamental ;

$I_h$  : valeur efficace du courant harmonique de rang  $h$  ;

$\varphi_1$  : déphasage du courant fondamental ;

$\varphi_h$  : déphasage de l'harmonique de rang  $h$ .

Le **THD** étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composantes harmoniques ( $h \geq 2$ ) et le fondamental du courant peut être exprimé en pourcentage et calculé comme suit :

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{I_H}{I_1} \quad (4.7)$$

$I$  : valeur efficace de  $i(t)$ .

$I_H$  : résultante des composantes harmoniques.



### 4.6.2 Facteur de puissance

En régime périodique, les expressions instantanées de tension et du courant sont données par :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (4.8)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \beta_n) \quad (4.9)$$

Le facteur de puissance est défini, dans le cas général, comme étant le rapport de la puissance active sur la puissance apparente.

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (4.10)$$

avec :

$$\varphi_n = \theta_n - \beta_n \quad (4.11)$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale, l'équation (4.10) devient :

$$F_p = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (4.12)$$

où :

$I_1$  : valeur efficace du fondamental du courant ;

$\varphi_1$  : est le déphasage entre la tension et le fondamental du courant.

Les puissances active et réactive définies pour la fréquence fondamentale étant respectivement :

$$P = V_1 i_1 \cos \varphi_1 \quad (4.13)$$

$$Q = V_1 i_1 \sin \varphi_1 \quad (4.14)$$

On définit la notion de puissance déformante  $D$  permettant de rendre compte des harmoniques:

$$D = V_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2} \quad (4.15)$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2 + Q^2}} \quad (4.16)$$

Ainsi, les harmoniques de courant créent une puissance dite déformante qui dégrade le facteur de puissance. On remarque qu'en régime sinusoïdal la puissance déformante est nulle et le facteur de puissance s'exprime simplement par [46,52]:

$$FP = \cos \varphi_1 \quad (4.17)$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

### 4.6.3 Normes de la qualité d'énergie électrique

La **CEI** (Commission Electrotechnique Internationale) et **IEEE** (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. La **CEI** est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'**IEEE** est une association professionnelle.

Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [61].

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000). Nous pouvons citer à titre d'exemple:

**La norme CEI 61000-2-2:** elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Ses caractéristiques sont indiquées dans le tableau 4.2. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

**Tableau 4.2** Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+1,3*25/h				

**La norme CEI 61000-3-2:** cette norme (voir tableau 4.3) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

**Tableau 4.3** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
Harmoniques impaires	
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 * 15/h$
Harmoniques paires	
2	1,08
4	0,43
6	0,3

$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \cdot 8/h$
--------------------	------------------

Deux sociétés de l'IEEE travaillent aussi dans des domaines liés à la qualité de l'énergie, IAS (Industrial Applications Society) et PES (Power Engineering Society). Leurs activités de normalisation sont gérées par le comité SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Les deux normes principales de l'IEEE sont :

**IEEE 519** : (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems), 1992. Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau (voir tableau 4.4 et 4.5) [62].

**Tableau 4.4** Limite IEEE pour la distorsion harmonique de la tension

Tension au point de raccordement ( $V_n$ )	Distorsion harmonique individuelle (%)	THD $V_n$ (%)
$V_n \leq 69 \text{ KV}$	3,0	5,0
$69 \text{ KV} < V_n \leq 161 \text{ KV}$	1,5	2,5
$V_n > 161 \text{ KV}$	1,0	1,5

**Tableau 4.5** Limite IEEE des émissions de courants harmoniques

$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
$I_{cc} / I_{ch}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	$TDD$
$< 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	-	5,0	2,0	1,0	15,0
$> 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
$< 20$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	1,25	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5

>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
$V_n > 161\text{kV}$						
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0

**IEEE 1159** : (IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality), 1995. Cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude (voir tableau 4.6) [63].

**Tableau 4.6** Classification IEEE des perturbations électromagnétiques

		Durée	Magnitude de tension
<b>Variations de courte durée</b>			
Instantané	<i>Creux</i>	0,5 – 30 cycles	0,1 – 0,9 p.u.
	<i>Surtension</i>	0,5 – 30 cycles	1,1 – 1,8 p.u.
Momentané	<i>Coupure</i>	0,5 cycles – 3s	< 0,1 p.u.
	<i>Creux</i>	30 cycles – 3s	0,1 – 0,9 p.u.
	<i>Surtension</i>	30 cycles – 3s	1,1 – 1,8 p.u.
Temporaire	<i>Coupure</i>	3s – 1 min	< 0,1 p.u.
	<i>Creux</i>	3s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
	<i>Surtension</i>	3s – 1 min	1,1 – 1,8 p.u.
<b>Variations de longue durée</b>			
	<i>Coupure longue</i>	> 1 min	0,0 p.u.
	<i>Surtension</i>	> 1 min	0,8 – 0,9 p.u.
	<i>Sous-tension</i>	> 1 min	1,1 – 1,2 p.u.

## 4.7 Solutions pour diminuer la pollution harmonique

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose des solutions pour diminuer la propagation de l'harmonique et fournir une bonne qualité d'énergie lors de la connexion avec la charge.

Il existe quelques méthodes permettant de minimiser la pollution harmonique provoquée par les convertisseurs utilisés dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Parmi les plus populaires et les plus efficaces, on retrouve deux types de solutions sont

envisageables. Il existe deux voies pour le filtrage de la pollution harmonique, soit le filtrage passif (solution classique) ou bien le filtrage actif (solution moderne) [64].

#### 4.7.1 Filtrage passif

Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série est placé en parallèle avec la charge (figure 4.7a). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passe-haut du second ordre (figure 4.7b) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure de la charge et de la nature des récepteurs. Il est en général plus aisé et moins coûteux de rejeter par cette technique les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [65].



(a) Filtre passif résonant

(b) Filtre passif amorti

**Figure 4.7** Filtre passif

#### 4.7.2 Filtrage actif

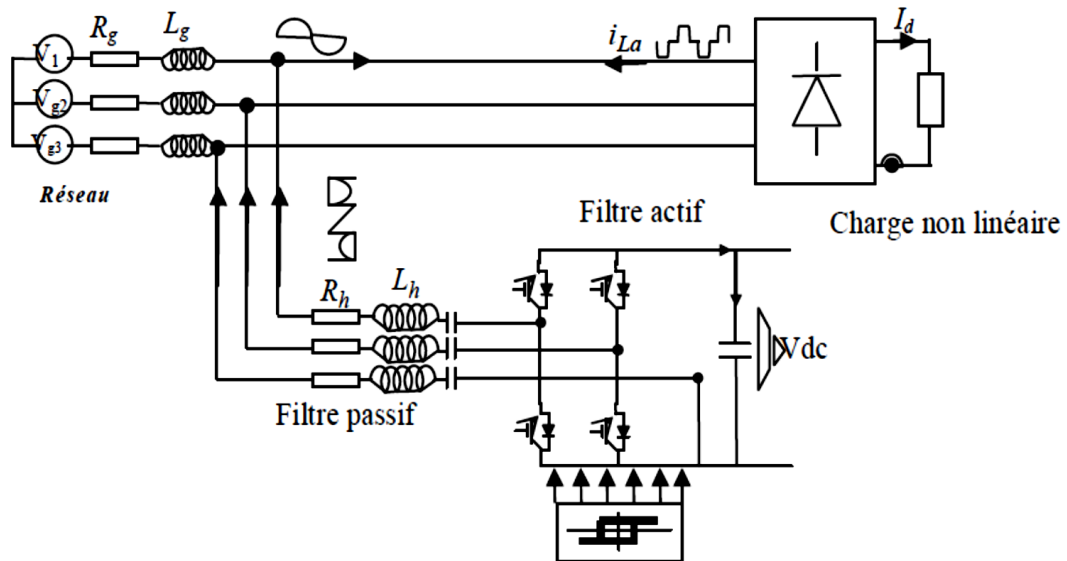
Une nouvelle structure de filtres appelés filtres actifs ont été plus récemment développés. Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

En injectant un courant en opposition de phase avec les harmoniques de la charge (courants perturbateurs), le filtre actif permet d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et répond ainsi à cette problématique [64,65].

Il existe plusieurs topologies de filtres actifs selon les critères de performance recherchés. Les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle ou hybride, c'est-à-dire, l'association d'un filtre actif et d'un filtre passif. Il existe également l'association d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle qui se nomme : conditionneur universel de la qualité

d'onde. Le filtre peut être à structure de courant ou à structure de tension selon le type d'élément lui servant de source d'énergie [65].

Une nouvelle configuration pour le convertisseur de puissance d'un filtre hybride triphasé est présentée dans la figure 4.8. Ce convertisseur de puissance utilise seulement une structure de pont en deux-bras et un condensateur. Le filtre hybride de puissance est configuré par le convertisseur de puissance proposé en série lié à un ensemble de filtres passifs [56].



**Figure 4.8** Configuration du filtre hybride de puissance à l'aide du convertisseur de puissance

## 4.8 Intégration d'un système éolien avec la charge

L'augmentation de la puissance éolienne installée actuellement a un impact croissant sur le réseau de transport du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes d'éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité.

La nature fluctuante du vent provoque une variation importante de fréquence à la sortie du générateur, d'où la nécessité de lier ce dernier avec la charge ou le réseau par des convertisseurs statiques. Ces derniers sont susceptibles d'améliorer la qualité d'énergie en utilisant des techniques adéquates de commande. Les convertisseurs ainsi utilisés permettent d'exploiter les génératrices synchrones à des vitesses de rotation importantes et variables ce qui augmente et améliore davantage la puissance extraite de la turbine avec différentes vitesses de vent.

Après la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec la turbine dans la chaîne globale de l'énergie éolienne, le système éolien est à présent connecté avec la charge par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.

#### 4.8.1 Étude de connexion

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité et une bonne qualité de puissance à moindres coûts, le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance.

##### 4.8.1.1 Description du système

La chaîne de conversion d'énergie éolienne est connectée avec la charge à travers une interface d'électronique de puissance qui se compose d'un redresseur à diode (non commandé), d'un bus continu DC-DC et d'un onduleur de tension à MLI (modulation de largeur d'impulsion). Pour assurer une bonne qualité d'énergie fournie à la charge électrique et pour éliminer les harmoniques, il faut placer un filtre passif avec une inductance et capacité de filtrage ( $L_f$ ,  $C_f$ ) entre l'onduleur de tension et la charge. Le système proposé est représenté sur la figure 4.9 suivante :

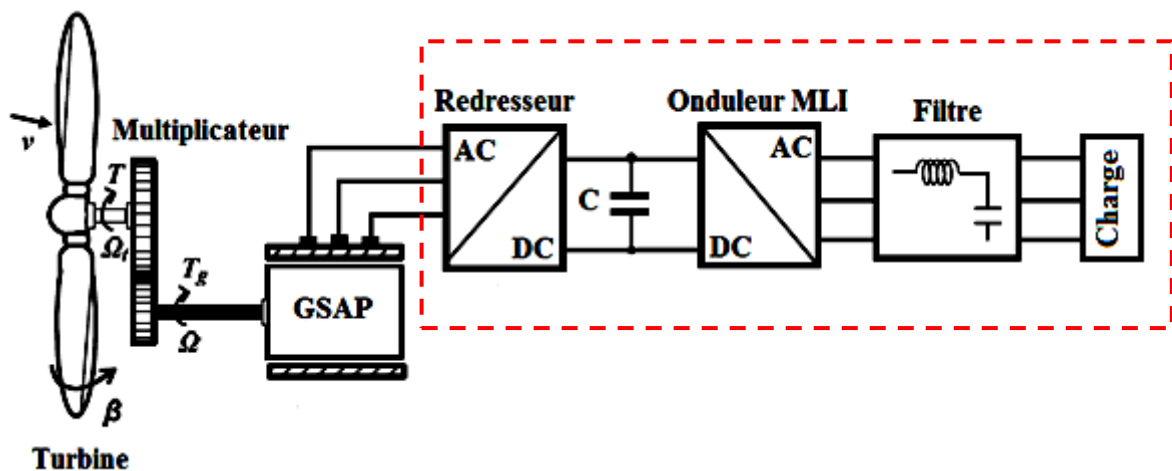


Figure 4.9 Chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée avec la charge

Comme les modèles de la turbine, du multiplicateur, de l'arbre de transmission et de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) ont été présentés dans les chapitres précédents, ce chapitre est consacré à l'étude de la connexion du système éolien avec la charge à travers l'interface d'électronique de puissance et le filtre passif LC (encadré en rouge de la figure 4.9) [66].



Le rôle du filtre LC est de minimiser les harmoniques fournies à la charge et assurer une bonne qualité d'énergie électrique. Le système étudié est représenté en détail dans la figure suivante (figure 4.10) :

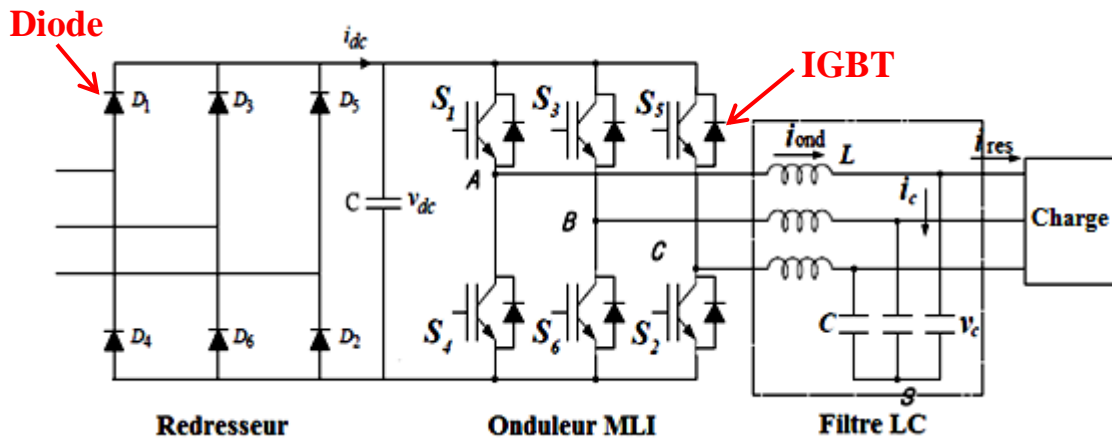


Figure 4.10 Système étudié en détails

## 4.8.2 Modélisation des éléments de connexion avec la charge

### 4.8.2.1 Modélisation du redresseur triphasé à diode

Le redresseur est un convertisseur « AC/DC ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif et il est représenté par la figure 4.11 [67] :

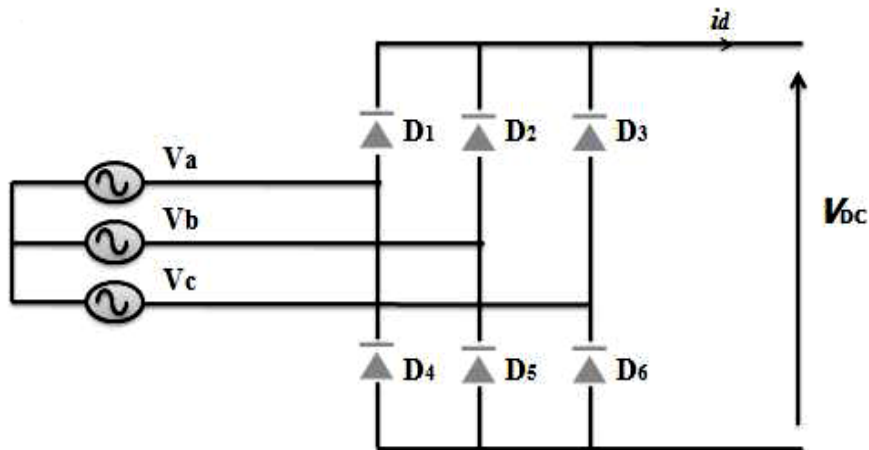


Figure 4.11 Représentation du redresseur triphasé à diode

Ce redresseur comporte trois diodes ( $D_1, D_2, D_3$ ) à cathode commune assurant l'allée du courant  $I_d$  et trois diodes ( $D_4, D_5, D_6$ ) à anode commune assurant le retour du courant  $I_d$ . Si on suppose que le redresseur est alimenté par trois tensions triphasées équilibrées.

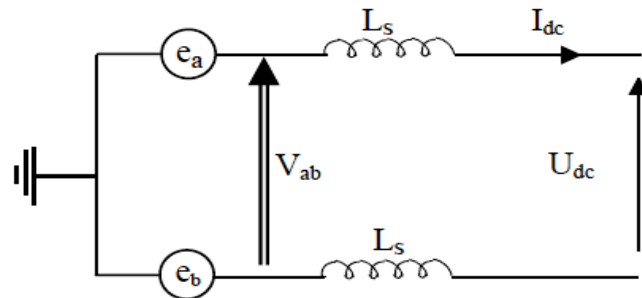
$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4.18)$$

Avec ces hypothèses, chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période. Dans ce cas, les courants de ligne  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  prennent à tour de rôle la valeur et la forme du courant continu  $I_{dc}$ . Les relations entre les tensions d'entrée et de sortie d'une part, et les courants d'entrée et de sortie d'autre part sont les suivantes [67,68].

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_{ab \max} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} V_{a \text{ eff}} \quad (4.19)$$

où  $V_{dc}$  et  $I_{dc}$  sont les valeurs moyennes de la tension et du courant en sortie du redresseur, et  $V_{abc}$  et  $I_{abc}$  sont les tensions et courants des trois phases côté alternatif.

Considérant une séquence de conduction entre les deux phases  $a$  et  $b$ ; on aura le schéma équivalent de la figure 4.12 :



**Figure 4.12** Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale

En appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous aurons l'équation suivante reliant le courant  $I_a$  avec les tensions  $V_a$  et  $V_b$ :

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_a - V_b + V_{dc}) \quad (4.20)$$

On déduit alors les expressions des courants  $I_b$  et  $I_c$  en fonction des tensions  $V_a$ ,  $V_b$ , et  $V_c$  résultants des circuits équivalents correspondants aux séquences de conduction des phases  $(a-c)$  et  $(b-c)$ :

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_b - V_c + V_{dc}) \quad (4.21)$$

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_c - V_a + V_{dc}) \tag{4.22}$$

Les commutations instantanées entre les différentes phases sont illustrées d'une manière claire avec les allures des tensions et des courants en amont et en aval du pont de diodes représentées sur les figures 4.13; 4.14; et 4.15 [17,69].

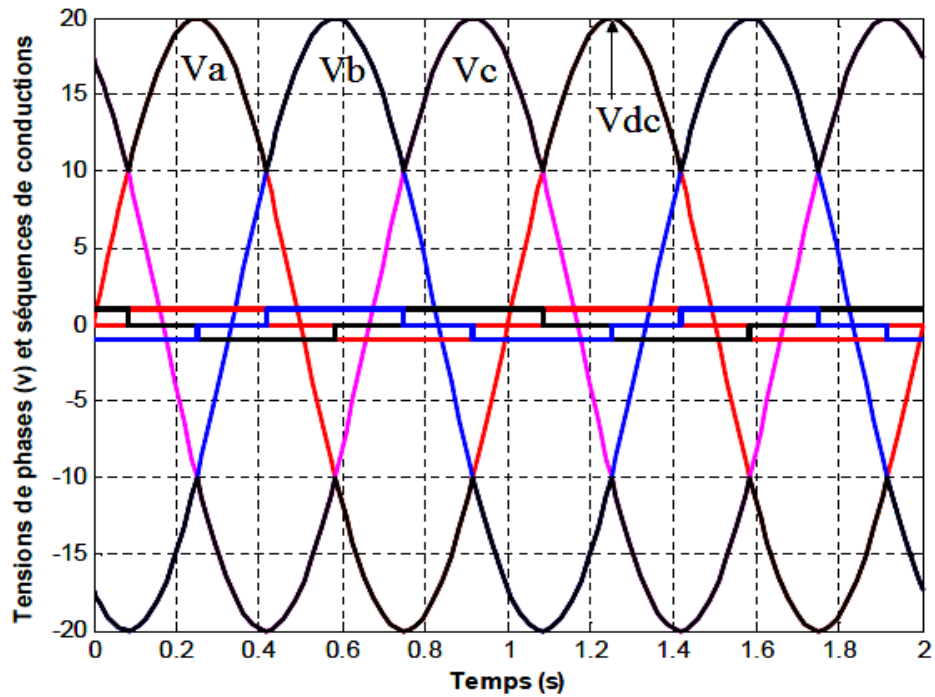


Figure 4.13 Tensions de phases et tension redressée

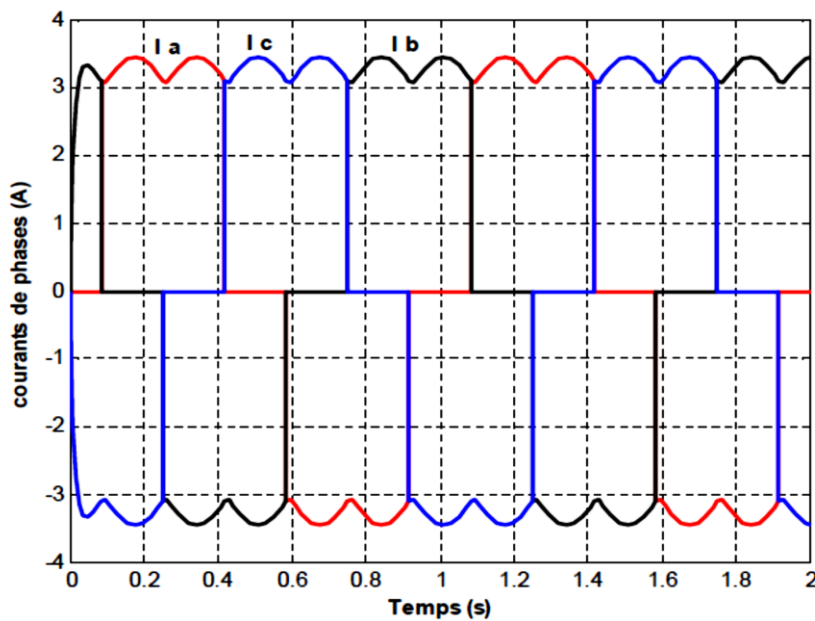
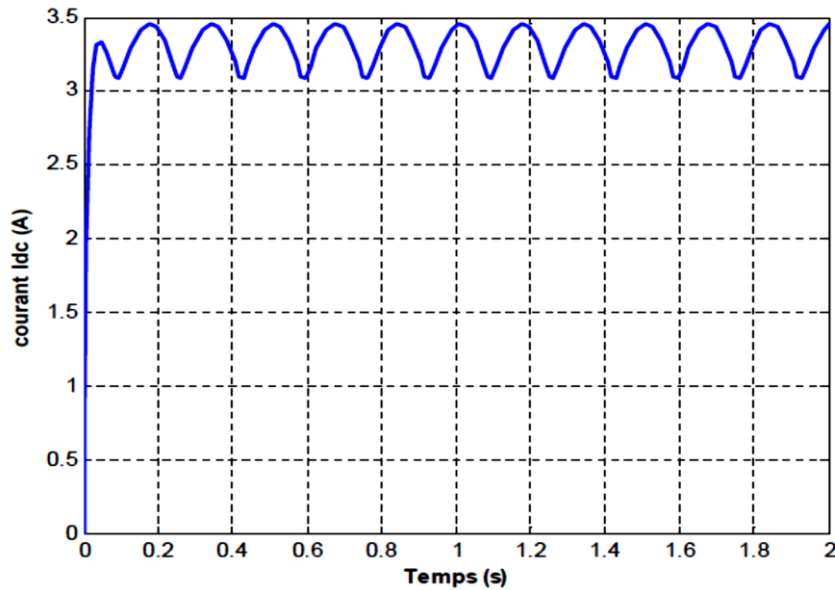


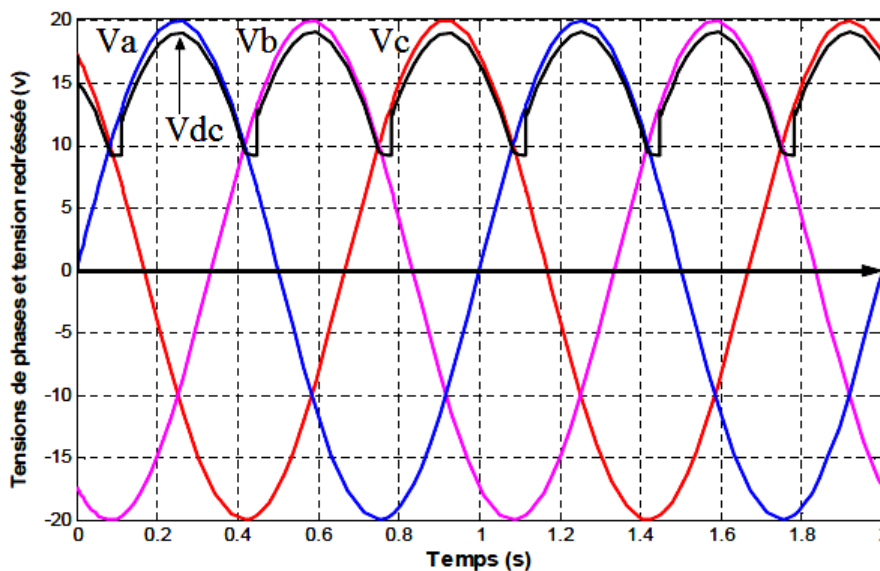
Figure 4.14 Courants de phases en amont du pont de diodes



**Figure 4.15** Courant redressé  $I_{dc}$  en aval du pont de diode

En réalité, la supposition précédente n'est plus juste à cause de l'effet des inductances non négligeables qui s'opposent aux variations brutales des courants et provoquent ainsi ce qu'on appelle phénomène d'empiètement des phases pendant le processus de commutation [69].

Lorsqu'en tenant compte du phénomène d'empiètement, l'allure de la tension redressée  $V_{dc}$  devient comme le montre dans la figure 4.16.



**Figure 4.16** Tension redressée avec phénomène d'empiètement

#### 4.8.2.2 Modélisation du bus continu

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure 4.17 nous montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (4.23)$$

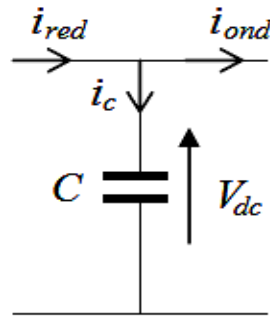


Figure 4.17 Schéma électrique du bus continu

La capacité de filtrage  $C$  va permettre d'obtenir une tension quasi continue (voir figure 4.18).

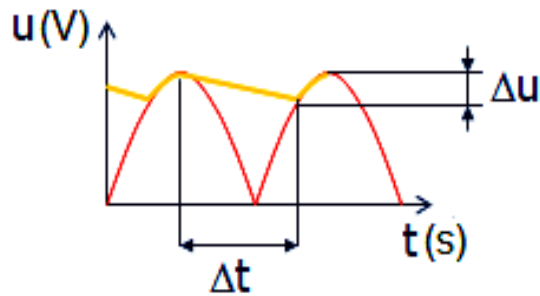


Figure 4.18 Effet de la capacité de filtrage sur la tension de sortie

Le bus continu est modélisé par la connaissance de la tension aux bornes du condensateur obtenue en intégrant l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (4.24)$$

D'où :

$$V = \int \frac{dV}{dt} + V(t_0) \quad (4.25)$$

où  $V(t_0)$  est la valeur de la tension à l'instant initial  $t_0$ .

4.8.2.3 Modélisation de l'onduleur (MLI)

L'onduleur de tension est un convertisseur statique du domaine de l'électronique de puissance. Il assure la transformation de l'énergie d'une source continue (tension redressé  $V_{dc}$ ) en une énergie alternative. Il fonctionne en commutation forcée. Il est conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Il permet d'imposer des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables par la commande. Le schéma structurel de l'onduleur est illustré par la figure 4.19. Chaque IGBT-diode assemblé en parallèle forme un interrupteur bi-contrôlable (à l'ouverture et à la fermeture) [69,70].

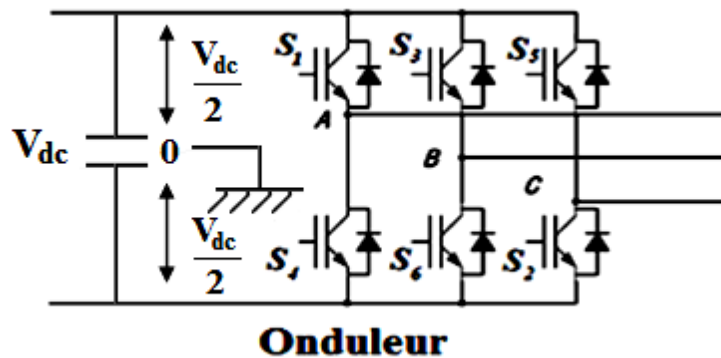


Figure 4.19 Représentation de l'onduleur de tension

Les couples d'interrupteurs (IGBT- diode) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

Les diodes ( $D_i (i=1, 2, 3, \dots, 6)$ ) sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBTs. L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande ( $S_i (i=a, b, c)$ ).

- $S_i = 1$ , le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$ , le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Ainsi, on peut écrire les tensions de phase  $V_{i n a, b, c}$  en fonction des signaux de commande  $S_i$  :

$$V_{i n a, b, c} = S_i V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} \tag{4.26}$$

Les trois tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « 0 ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} + V_{0c} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \tag{4.27}$$

Soit  $n$  le point neutre du coté alternatif, alors on a :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (4.28)$$

Le système est considéré équilibré, il en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (4.29)$$

La substitution de (4.28) dans (4.27) donne :

$$V_{n0} = -\frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (4.30)$$

En remplaçant (4.30) dans (4.28), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad (4.31)$$

L'utilisation de l'expression (4.26) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Avec  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  les tensions de sortie de l'onduleur. Par conséquent, l'onduleur est modélisé par la matrice de transfert  $T$  donnée par :

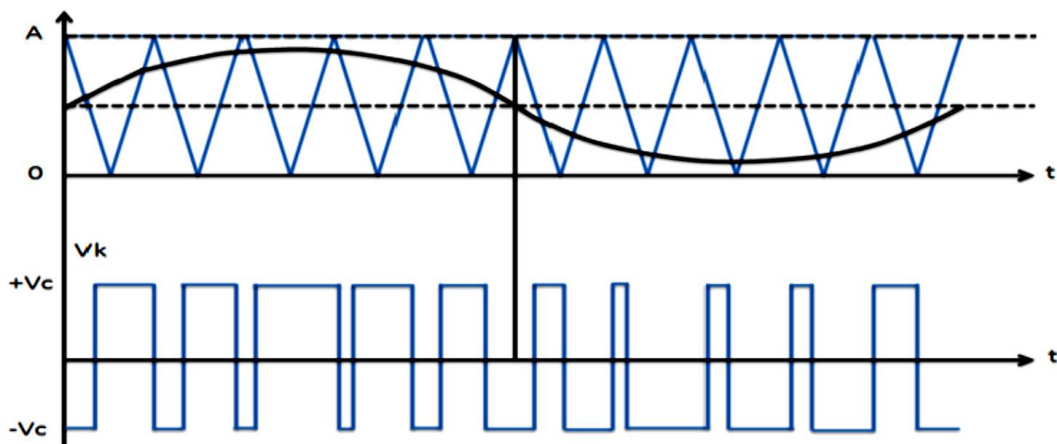
$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

#### - Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau de la commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau de puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents

de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur. Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis. L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système, et par conséquent d'augmenter le rendement [71].

Dans ce travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux (voir figure 4.20).



**Figure 4.20** Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

- Le premier est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, qui est appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'amplitude  $V_{mod}$  :

$$V_{mod} = \frac{V_m}{V_p} \quad (4.34)$$

avec :

$V_p$  : valeur de crête de la porteuse ;

$V_m$  : valeur maximale de la tension de référence.



Ainsi, on peut agir sur l'indice de modulation  $m$  :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (4.35)$$

$f_p$  : fréquence de la porteuse ;

$f_m$  : fréquence de la modulante.

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut exactement :

$$V_{i\max} = \frac{V_{dc}}{3} V_{mod} \quad (4.36)$$

où :

$V_{dc}$  : tension continue à l'entrée de l'onduleur.

#### 4.8.2.4 Modélisation du filtre LC

L'injection de la puissance à partir du système éolien à la charge est typiquement faite par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. Des harmoniques dans la tension de sortie du convertisseur sont habituellement atténués en reliant un filtre entre l'onduleur et la charge électrique, afin de faire face aux conditions de qualité de la puissance de charge.

Généralement, le problème harmonique peut être défini comme : la perturbation particulière qui, lancée par la présence des composants non linéaires des systèmes électriques, détermine une modification permanente des formes sinusoïdales de la tension et du courant, en termes de composants sinusoïdaux à une fréquence différente de celle de la composante fondamentale.

Les générateurs éoliens sont reliés avec la charge par des convertisseurs statiques et peuvent donc potentiellement causer des harmoniques, dégradant ainsi la qualité de l'énergie électrique et changeant les performances d'autres équipements sensibles aux harmoniques de tension. D'autre part, les convertisseurs statiques eux-mêmes sont sensibles aux harmoniques et peuvent fonctionner de manière non précise en raison de la présence des harmoniques. Ce phénomène rend l'utilisation des filtres dans ces systèmes indispensable.

La maîtrise des harmoniques est nécessaire pour permettre à l'utilisateur que ce soit pour un réseau électrique ou bien pour un site isolé (charge) d'avoir [72] :

- un réseau électrique **propre**, par la réduction du taux global de distorsion en courant (**THDi**) en minimisant ou éliminant les harmoniques.
- un taux de distorsion en tension (**THDv**) compatible avec les normes.
- de **bons** facteurs de puissance et de déphasage ( $\geq 0,94$ ).

- une installation conforme aux normes actuelles et à venir en matière de pollutions harmoniques.
- une minimisation des anomalies du système éolien en réseau (exploitation du maximum des énergies possible, réduction des pertes, etc.)

La réduction du  $\text{THD}_I$  et du  $\text{THD}_V$  dépend de la diminution des harmoniques de courants les plus importants. Pour cela, plusieurs solutions ont été proposées, par exemple :

- mettre une inductance à la sortie de l'onduleur pour réduire l'amplitude de ces harmoniques (en particulier ceux de rang élevé).
- mettre en sortie de l'onduleur un filtre anti-harmonique passif de type LCL adapté à la gamme d'harmoniques à éliminer.
- utiliser un filtre actif qui réagit en temps réel aux harmoniques présents pour les éliminer.

En ce qui concerne le filtrage de tension de sortie, les topologies des filtres passifs utilisées sont très diversifiées. La structure la plus adéquate avec les onduleurs à MLI est celle qui élimine les harmoniques de basse fréquence en prenant en considération l'effet résonant indésirable du circuit électrique filtre-charge, et cela par l'utilisation d'une commande appropriée [72,73].

Le **filtre LC** représenté à la figure 4.21 est souvent utilisé dans les systèmes éoliens connectés avec la charge électrique. Il est régi par les équations de tension et de courant explicitées ci-dessous [72].

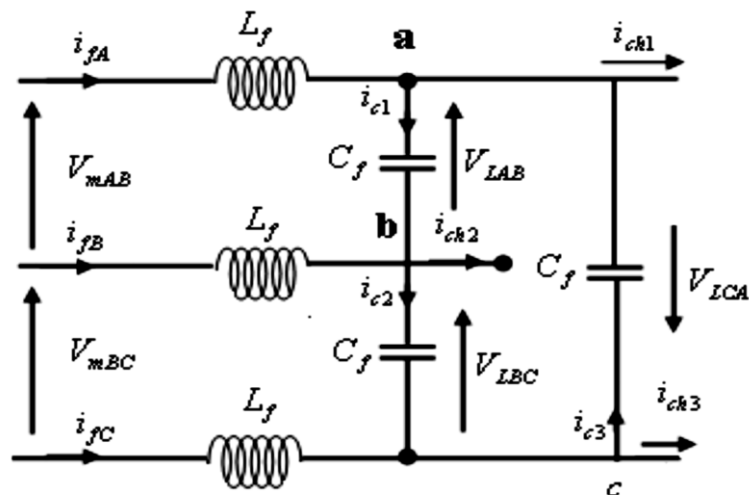


Figure 4.21 Circuit équivalent d'un filtre LC

A partir de la figure (4.21), on applique la première loi de Kirchoff (loi des nœuds). Aux points  $a$ ,  $b$  et  $c$ , on obtient les équations suivantes:

- **Nœud a :**

$$i_{fA} + i_{c3} = i_{c1} + i_{ch1} \Rightarrow i_{fA} + C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} = C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} + i_{c1} \quad (4.37)$$

- **Nœud b :**

$$i_{fB} + i_{c1} = i_{c2} + i_{ch2} \Rightarrow i_{fB} + C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} = C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} + i_{ch2} \quad (4.38)$$

- **Nœud c :**

$$i_{fC} + i_{c2} = i_{c3} + i_{ch3} \Rightarrow i_{fC} + C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} = C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} + i_{ch3} \quad (4.39)$$

Avec :

$$i_{c1} = C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} \quad (4.40)$$

$$i_{c2} = C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} \quad (4.41)$$

$$i_{c3} = C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} \quad (4.42)$$

La soustraction (4.37) de (4.38) donne :

$$\begin{aligned} i_{fA} - i_{fB} + C_f \left( \frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= C_f \left( \frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) + i_{ch1} - i_{ch2} \\ \Rightarrow C_f \left( \frac{dV_{LCA}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= -i_{fA} + i_{fB} + i_{ch1} - i_{ch2} \end{aligned} \quad (4.43)$$

La soustraction (4.38) de (4.39) donne :

$$\begin{aligned} i_{fB} - i_{fC} + C_f \left( \frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) &= C_f \left( \frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) + i_{ch2} - i_{ch3} \\ \Rightarrow C_f \left( \frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LCA}}{dt} - 2 \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) &= -i_{fB} + i_{fC} + i_{ch2} - i_{ch3} \end{aligned} \quad (4.44)$$

La soustraction (4.39) de (4.37) donne :

$$\begin{aligned} i_{fC} - i_{fA} + C_f \left( \frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) &= C_f \left( \frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) + i_{ch3} - i_{ch1} \\ \Rightarrow C_f \left( \frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) &= -i_{fC} + i_{fA} + i_{ch3} - i_{ch1} \end{aligned} \quad (4.45)$$

avec :

$$V_{LAB} + V_{LBC} + V_{LCA} = 0 \quad (4.46)$$

À partir des équations (4.43) à (4.46), on obtient :

$$\frac{dV_{LAB}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fAB} - \frac{1}{3C_f} i_{LAB} \quad (4.47)$$

$$\frac{dV_{LBC}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fBC} - \frac{1}{3C_f} i_{LBC} \quad (4.48)$$

$$\frac{dV_{LCA}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fCA} - \frac{1}{3C_f} i_{LCA} \quad (4.49)$$

avec :

$$i_{fAB} = i_{fA} - i_{fB}$$

$$i_{fBC} = i_{fB} - i_{fC}$$

$$i_{fCA} = i_{fC} - i_{fA}$$

$$i_{LAB} = i_{ch1} - i_{ch2}$$

$$i_{LBC} = i_{ch2} - i_{ch3}$$

$$i_{LCA} = i_{ch3} - i_{ch1}$$

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff (loi des mailles), les équations peuvent être écrites comme suit:

$$\frac{di_{fAB}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LAB} + \frac{1}{L_f} V_{mAB} \quad (4.50)$$

$$\frac{di_{fBC}}{dt} = -\frac{1}{L_f}V_{LBC} + \frac{1}{L_f}V_{mBC} \quad (4.51)$$

$$\frac{di_{fCA}}{dt} = -\frac{1}{L_f}V_{LCA} + \frac{1}{L_f}V_{mCA} \quad (4.52)$$

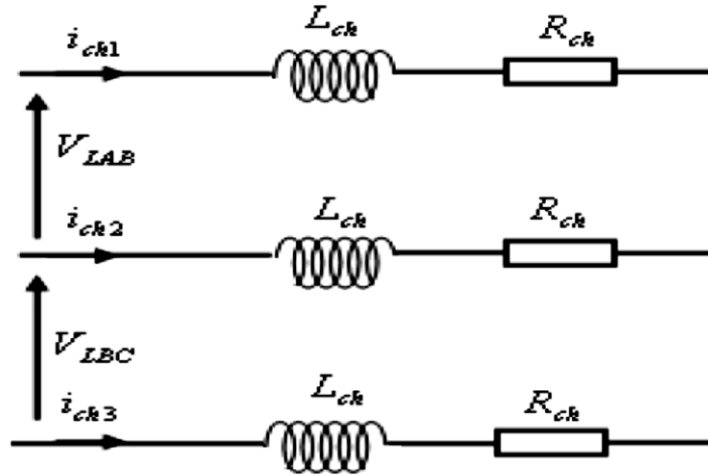


Figure 4.22 Schéma équivalent de l'impédance de la charge [73]

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff (loi des mailles) coté charge électrique (voir figure 4.22), les équations peuvent être décrites comme suit :

$$V_{LAB} = L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} + R_{ch}i_{ch1} - L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} - R_{ch}i_{ch2} \quad (4.53)$$

$$V_{LBC} = L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} + R_{ch}i_{ch2} - L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} - R_{ch}i_{ch3} \quad (4.54)$$

$$V_{LCA} = L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} + R_{ch}i_{ch3} - L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} - R_{ch}i_{ch1} \quad (4.55)$$

Les équations (4.53 à 4.55) peuvent être réécrites ainsi [72,73]:

$$\frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{LAB} + \frac{1}{L}V_{LAB} \quad (4.56)$$

$$\frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{LBC} + \frac{1}{L}V_{LBC} \quad (4.57)$$

$$\frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{LCA} + \frac{1}{L}V_{LCA} \quad (4.58)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{3C_f} I_f - \frac{1}{3C_f} I_L \tag{4.59}$$

$$\frac{dI_f}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_L + \frac{1}{L_f} V_f \tag{4.60}$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L} V_L + \frac{R}{L} I_L \tag{4.61}$$

avec :

$$V_L = [V_{LAB} \quad V_{LBC} \quad V_{LCA}]^T, I_f = [i_{fAB} \quad i_{fBC} \quad i_{fCA}]^T, V_f = [V_{fAB} \quad V_{fBC} \quad V_{fCA}]^T$$

### 4.9 Résultats de simulation

Les différentes simulations de toute la chaîne de conversion d'énergie éolienne, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink® ont permis d'évaluer les performances du système proposé.

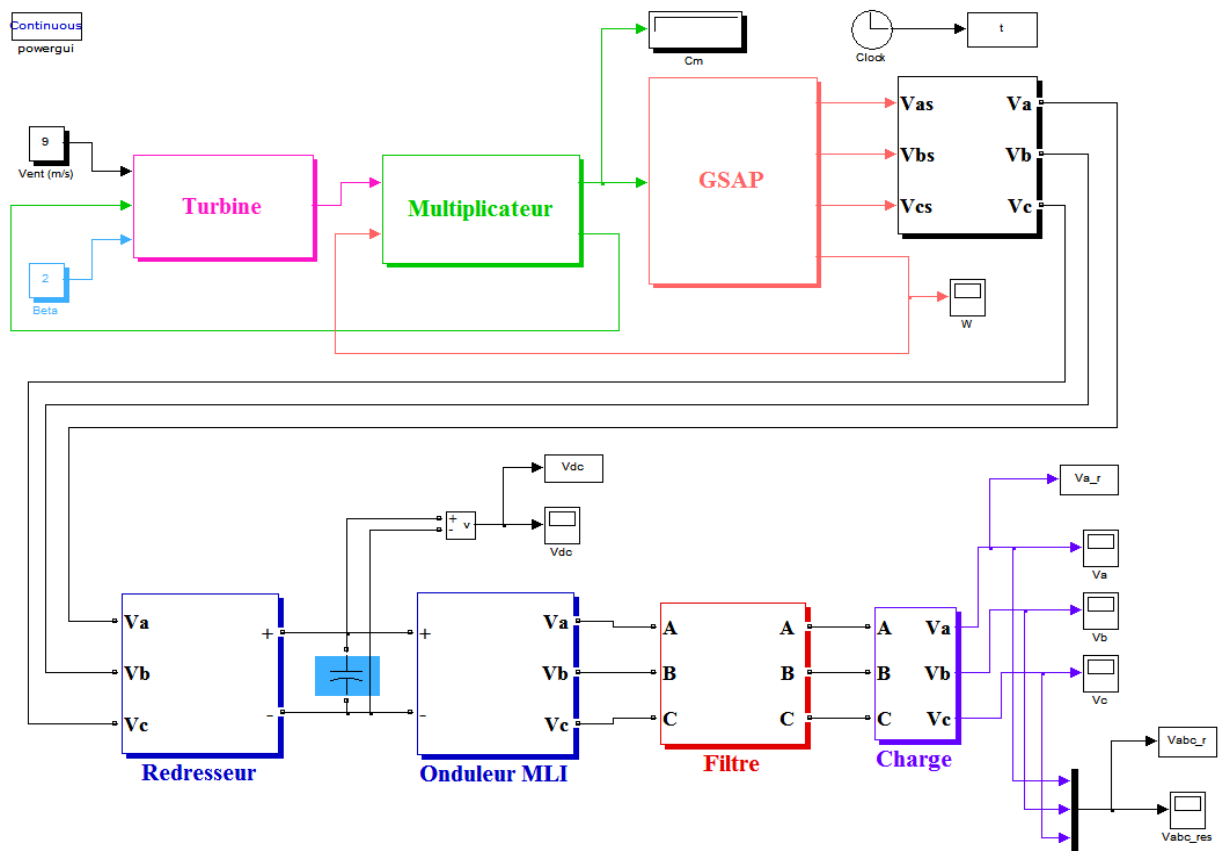


Figure 4.23 Modèle Simulink de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec filtrage

Nous avons connecté notre **GSAP** à une turbine éolienne avec une vitesse de vent constante, égale à 9 m/s. Les résultats des simulations sont les suivants :

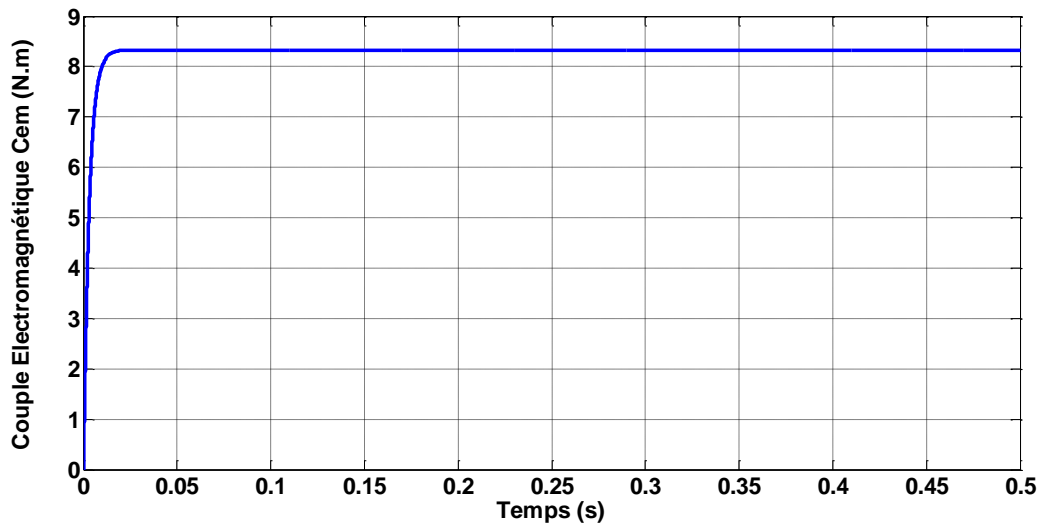


Figure 4.24 Couple électromagnétique

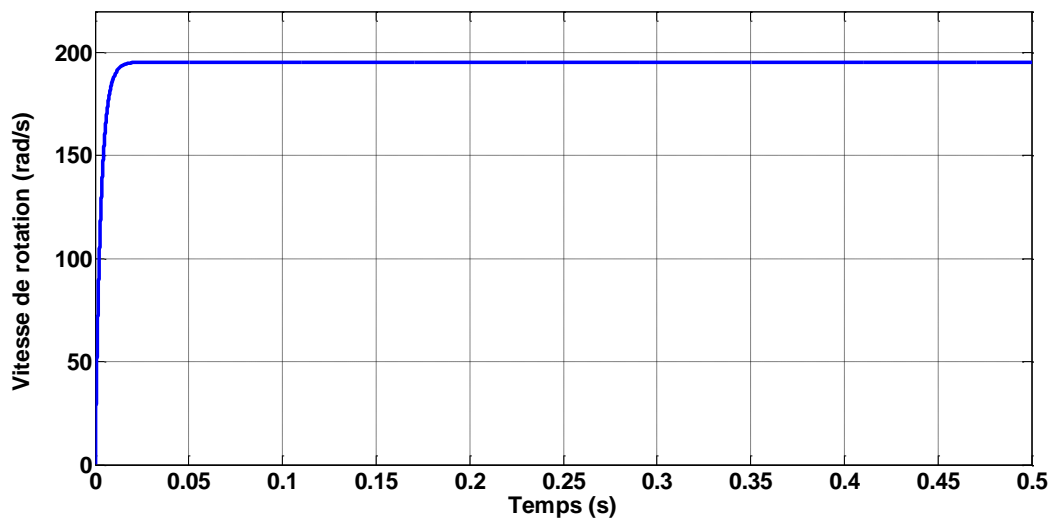
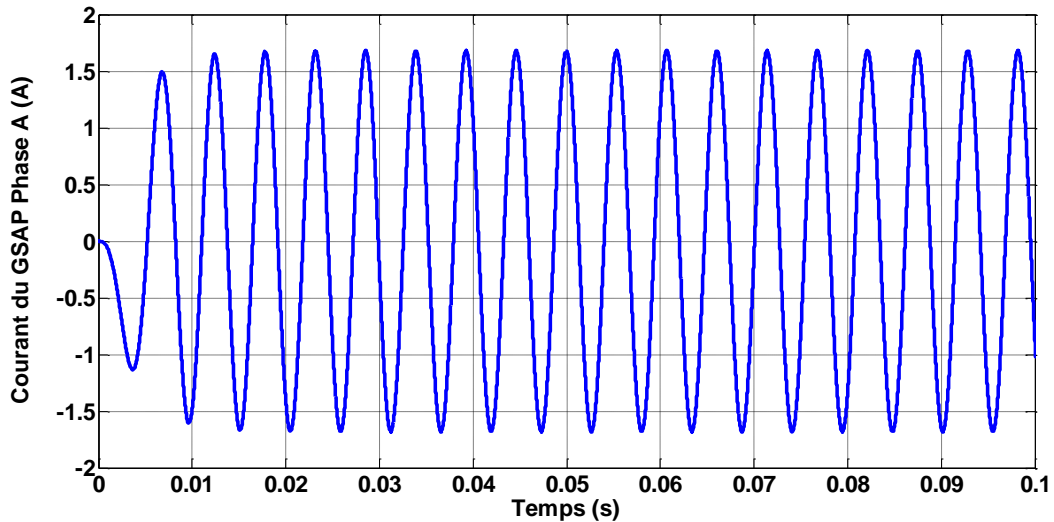


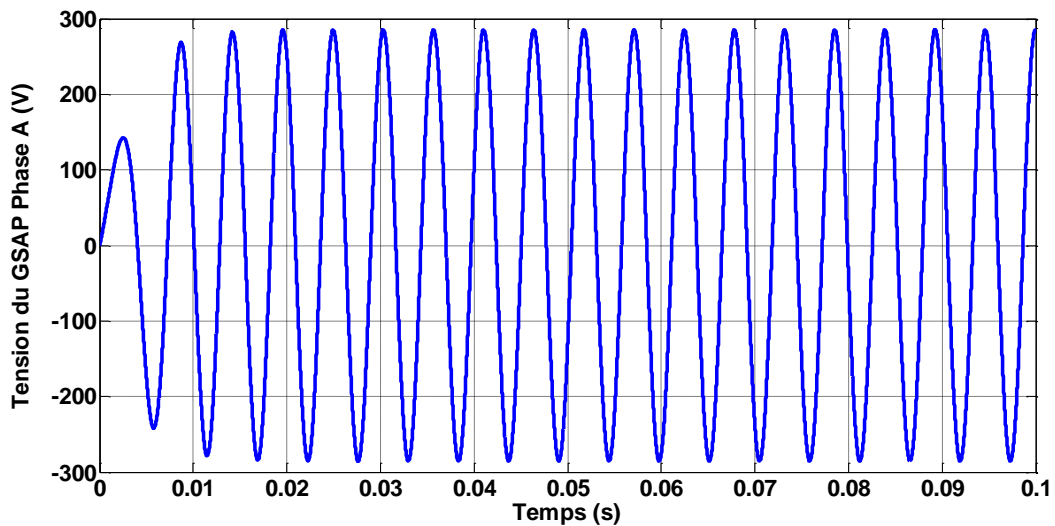
Figure 4.25 Vitesse de rotation du GSAP

Les figures 4.24 et 4.25 représentent respectivement le couple électromagnétique  $C_{em}$  et la vitesse de rotation de la génératrice (GSAP).

La tension et le courant simples statoriques de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) sont illustrés par les figures 4.26 et 4.27. Ils sont de forme sinusoïdale avec une amplitude de  $\pm 285$  V et  $\pm 1,75$  A.



**Figure 4.26** Courant simple de la GSAP (phase A)



**Figure 4.27** Tension simple de la GSAP (phase A)

La figure 4.28 représente la tension redressée  $V_{dc}$  par le pont à diode (redresseur non commandé). On n'observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 420 V, après un régime transitoire de 0,7 s.

La tension  $V_{dc}$  est une tension continue, on trouve à la sortie du redresseur une capacité  $C$  servant à filtrer la tension, cette tension alimente l'onduleur à MLI.



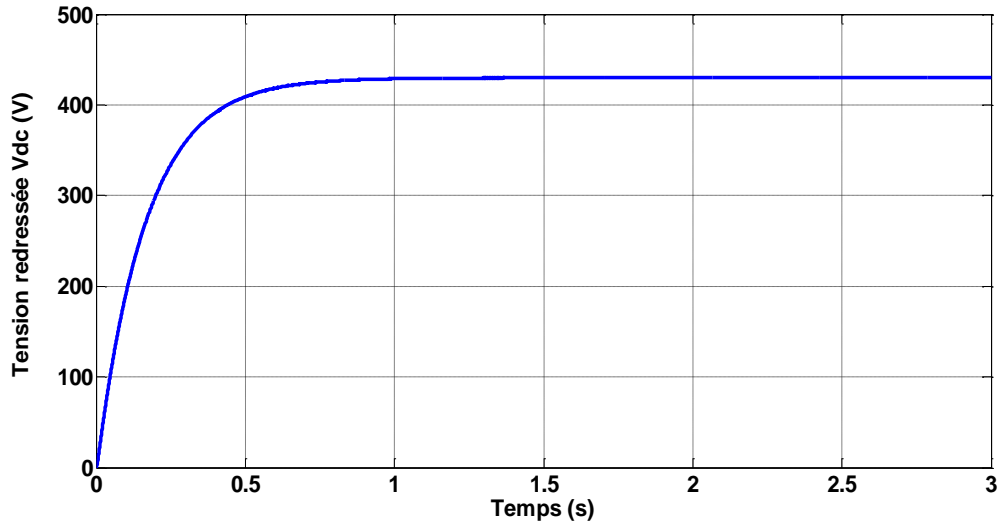


Figure 4.28 Tension en sortie du redresseur

### 4.9.1 Avant filtrage

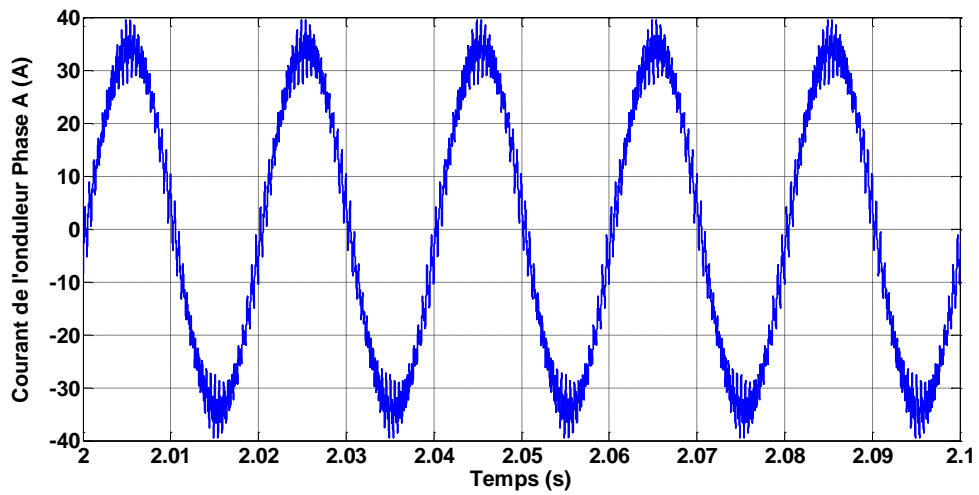


Figure 4.29 Courant simple à la sortie de l'onduleur

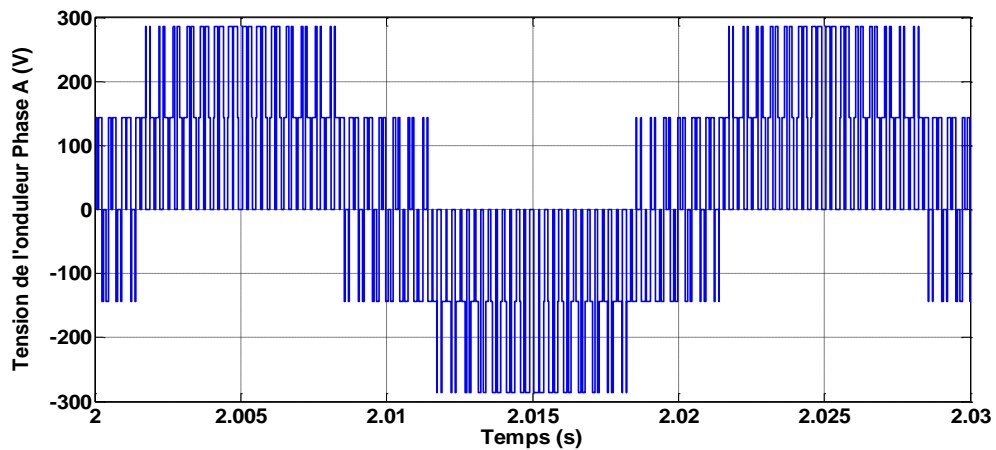
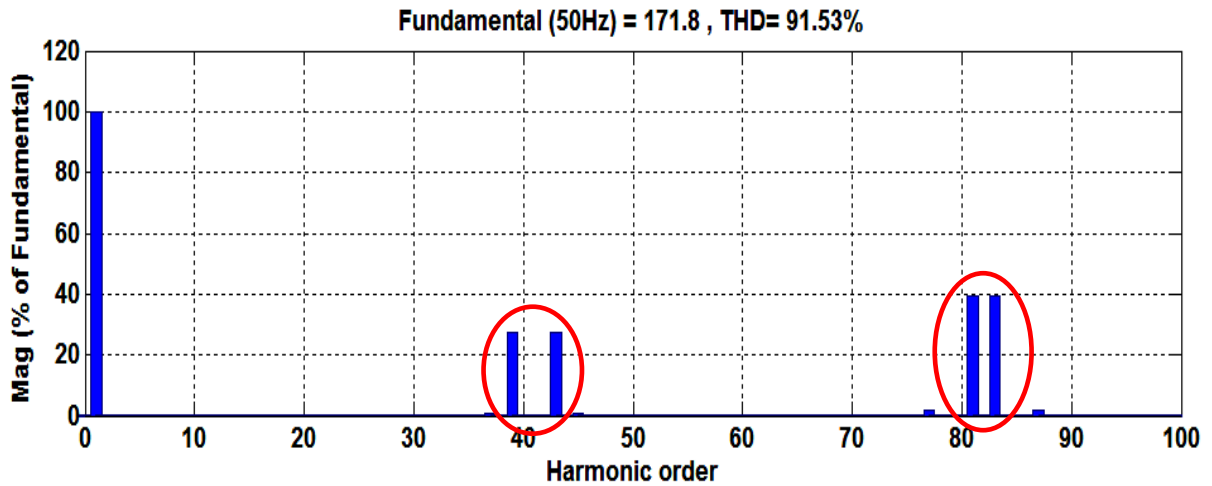


Figure 4.30 Tension simple à la sortie de l'onduleur

Les figures 4.29 et 4.30 montrent respectivement le courant à la sortie de l'onduleur et la tension modulée (tension à la sortie de l'onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion MLI). On remarque des déformations dans l'allure du courant et de la tension à cause de la présence des harmoniques, donc il faut identifier ces harmoniques par le spectre harmonique FFT (Fast Fourier Transform).

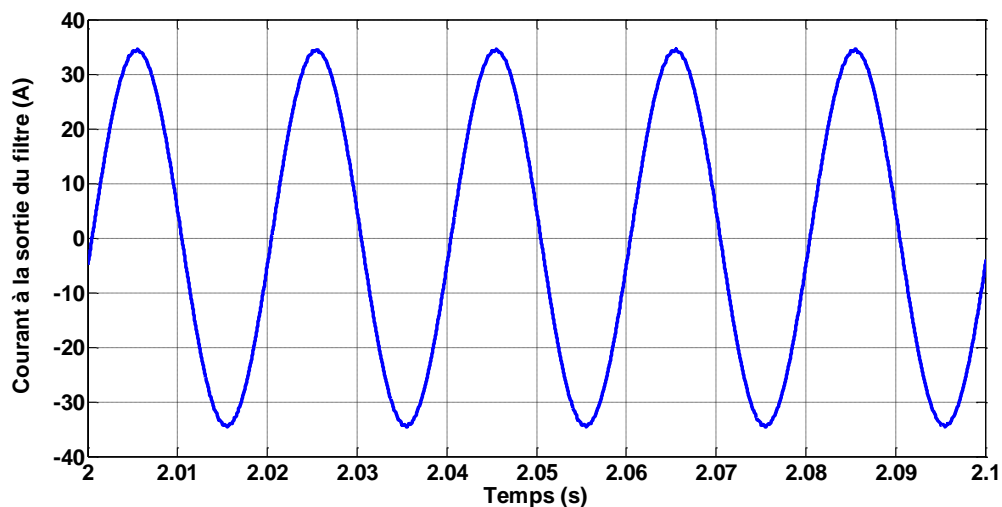


**Figure 4.31** Spectre harmonique de tension avant filtrage

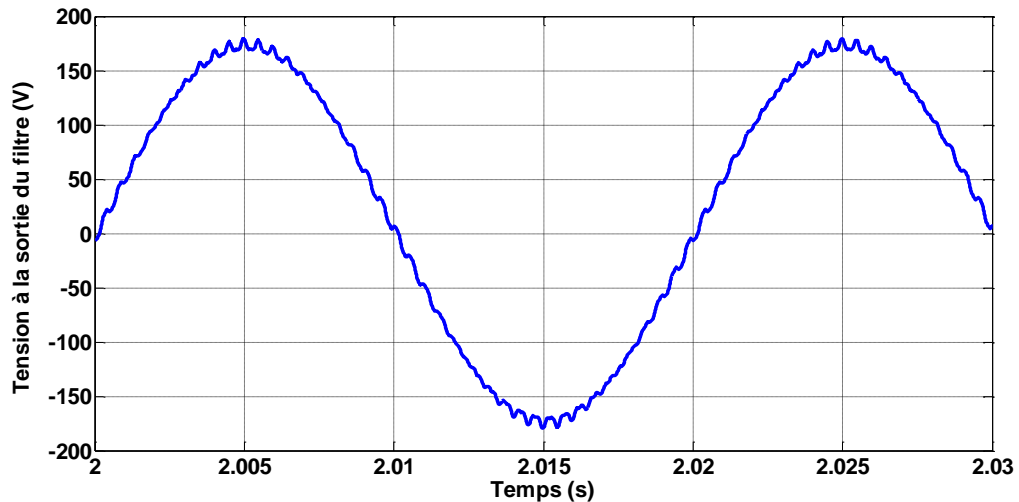
D'après la figure 4.31, le spectre harmonique montre que les harmoniques sont de rangs : 39h, 43h, 81h et 83h. On observe que les harmoniques de rang pair sont nuls. Le taux de distorsion harmonique de tension  $THD_v$  à une grande valeur de 91,53%.

Il faut placer un filtre LC raccordé entre l'onduleur et la charge pour réduire la propagation des harmoniques fournie à la charge.

#### 4.9.2 Après filtrage



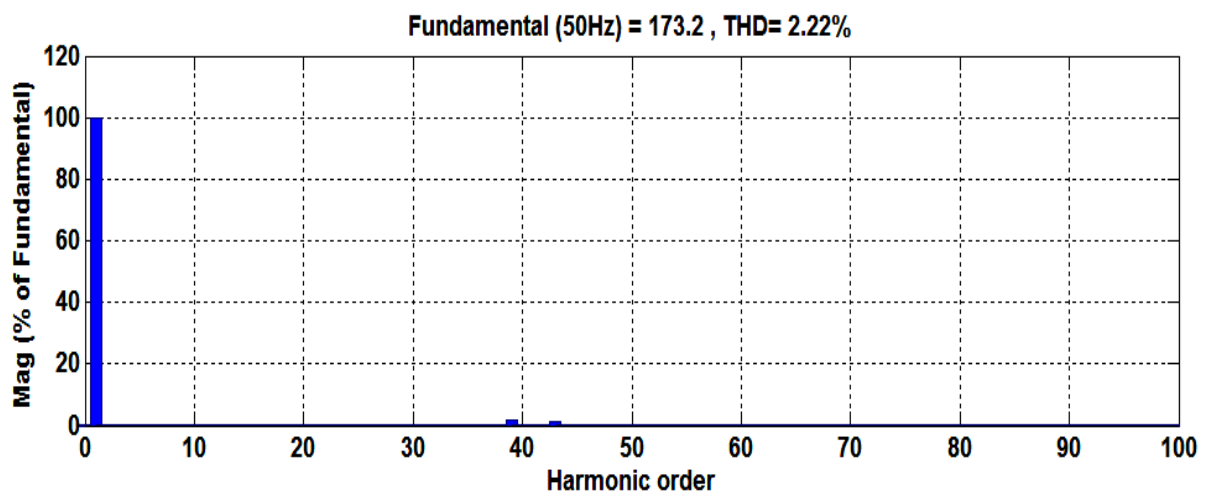
**Figure 4.32** Courant simple fourni à la charge



**Figure 4.33** Tension simple fournie à la charge

Les figures 4.32 et 4.33 représentent le courant et la tension fournis à la charge. Après l'application du filtre LC, on enregistre une nette amélioration dans l'allure de la tension et du courant avec des courbes moins bruitées.

Le rôle du filtre LC est d'atténuer les harmoniques engendrés par l'onduleur.



**Figure 4.34** Spectre harmonique de tension après filtrage

Après filtrage, le courant et la tension ont été dépollués à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique de tension avec un  $THD_v$  de taux 2,22% inférieur à 5% (norme IEEE standard 514) comme illustré dans la figure 4.34.

Les résultats de simulation réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink<sup>®</sup>, montrent clairement l'intérêt du filtre LC qui joue un rôle prépondérant pour une fourniture d'énergie propre et de bonne qualité issue de l'éolienne à la charge électrique.

Tableau 4.7 Paramètres de simulations

Paramètres de la turbine éolienne	
Rayon de l'éolienne	$R=4,5$ m
Gain du multiplicateur de vitesse	$G=75$
Masse volumique de l'air	$\rho= 1,22$ kg/m <sup>3</sup>
Paramètres de la GSAP	
Puissance nominale	$P=600$ W
Résistance statorique	$R_s=0,895$ $\Omega$
Inductance statorique selon l'axe d	$L_d= 1,2$ mH
Inductance statorique selon l'axe q	$L_q=2,11$ mH
Flux des aimants permanents	$\varphi_f = 0,9$ Wb
Nombre de paire de pôles	$P =3$
Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	$J= 0,00141$ kg.m <sup>2</sup>
Paramètres du filtre LC	
Inductance du filtre	$L_f = 0,4$ mH
Capacité du filtre	$C_f = 100$ $\mu$ F
Paramètres de la charge	
Résistance de la charge	$R_{ch} =5\Omega$
Inductance de la charge	$L_{ch} =2$ mH

## 4.10 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre apporte une synthèse sur les contraintes liées au raccordement des éoliennes avec la charge et les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de l'énergie électrique, ainsi que les solutions possibles pour minimiser ces effets. Particulièrement et plus précisément nous nous sommes intéressés aux problèmes engendrés par la pollution harmonique dans la charge électrique.

Une application du filtre a été traitée lors de la connexion du système éolien avec la charge. Il s'agit d'un filtre LC placé entre l'onduleur à MLI et la charge. Les résultats obtenus dans ce travail nous permettent de visualiser l'efficacité du filtre. En fait, le taux de distorsion harmonique de tension  $THD_v$  passe de 91,53% à 2,22% après l'utilisation du filtre. Ainsi que les harmoniques ont été minimisés de façon très réduite, c'est-à-dire les signaux de la tension et le courant sont devenus proches d'un signal sinusoïdal.

Enfin, des normes internationales ont été mises en place pour assurer une bonne qualité d'énergie électrique fournie aux consommateurs (réseau électrique, site isolé,...) sont respectées grâce au filtrage des harmoniques.

# *Chapitre 5*

*Transfert énergétique dans  
un système photovoltaïque-  
supercondensateurs*

## **5.1 Introduction**

Le déploiement de sources d'énergies renouvelables nécessite de mettre en œuvre des moyens de stockage ayant différentes constantes de temps pour palier à l'intermittence de la source en amont et pour satisfaire les besoins de l'utilisation en aval. Les batteries sont le dispositif de stockage le plus conventionnel pour le stockage de l'énergie électrique. Elles peuvent être utilisées avec des dispositifs de stockage complémentaires ayant des densités de puissance plus élevées tels que les supercondensateurs et les volants d'inertie [74,75].

Les supercondensateurs présentent l'avantage d'une faible dégradation pour un nombre élevé de cycles d'utilisation ( $> 10000$ ) et d'une structure en charbon activé [76,77]. Le stockage de l'énergie photovoltaïque par les supercondensateurs est effectué ou envisagé pour de nombreuses applications telles que le filtrage de la puissance de rectification, le démarrage des pompes solaires et l'éclairage public [78-80]. Les supercondensateurs sont de plus en plus intégrés dans des systèmes de stockage hybrides mettant en jeu une source photovoltaïque avec d'autres sources et moyens de stockage complémentaires les uns par rapport aux autres pour pallier l'intermittence. Il est nécessaire d'envisager la gestion des commutations entre sources et dispositifs de stockage, et d'assurer l'optimisation du transfert énergétique de la source vers l'utilisation.

Dans cette partie, il s'agira de rappeler le principe du stockage d'énergie électrique par les supercondensateurs et leur intégration dans les systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque. La conversion photovoltaïque sera rappelée au préalable. Une modélisation adéquate du stockage d'énergie par supercondensateurs sera justifiée. La gestion et l'optimisation du stockage de l'énergie est par la suite étudiée.

## **5.2 Système photovoltaïque**

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, mais ils peuvent fonctionner au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction de watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

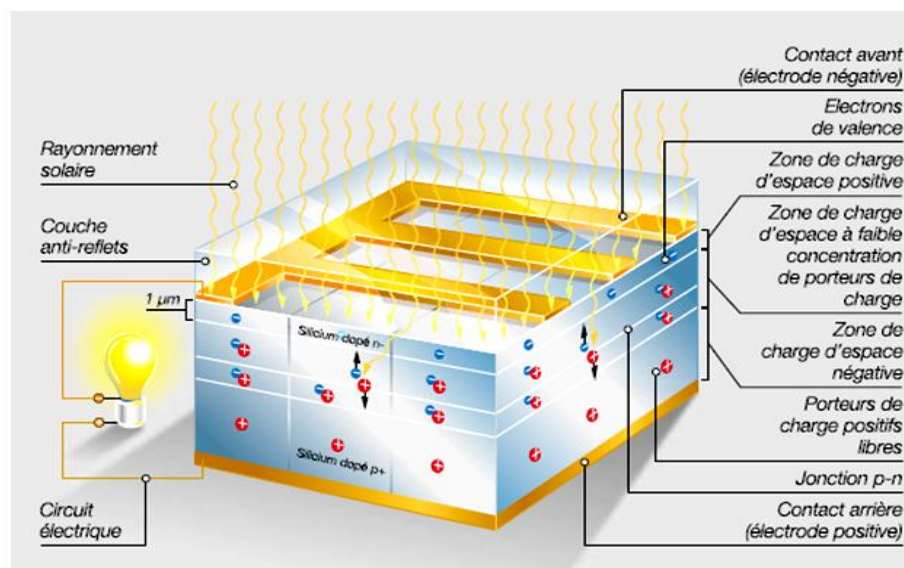
### 5.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque

Du fait de ses propriétés de semi-conducteur, un bloc de silicium exposé au rayonnement solaire change de rapport de charge. C'est cette modification qui permet la conversion directe en énergie électrique, autrement dit en courant. De nombreux scientifiques ont commencé à s'intéresser au silicium dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle. En 1839, le physicien Alexandre Edmond Becquerel a découvert l'effet photoélectrique (l'effet photovoltaïque) par hasard, en constatant que la durée de vie d'une pile s'allongeait lorsqu'elle était exposée au rayonnement du soleil. Mais ce n'est qu'en 1949, avec la découverte de la jonction p-n, qu'ont véritablement été jetées les bases de la technologie solaire moderne.

Les cellules solaires sont pour la plupart composées de silicium, un matériau semi-conducteur dont les électrons, lorsqu'ils sont exposés à un apport d'énergie (comme la lumière), se mettent en mouvement pour se séparer du réseau atomique et créer un flux de courant. Le silicium est le deuxième élément le plus abondant sur la Terre. C'est donc une matière première quasi inépuisable.

Chaque cellule est constituée de deux couches de silicium : une couche mince fortement dopée n-1, et une couche plus épaisse faiblement dopée p+2. Le silicium de type n- est dopé au phosphore (élément pentavalent). Le silicium de type p+ est dopé au bore (élément trivalent).

Les électrons de valence et les porteurs de charge positifs libres se lient pour former la zone de charge d'espace à faible concentration de porteurs de charge. La couche dopée n- reçoit ainsi une charge d'espace positive et la couche dopée p+ une charge d'espace négative.



**Figure 5.1** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Si une particule de lumière (photon) rencontre alors un électron dans la zone de charge d'espace, celui-ci se sépare de l'atome et rejoint la zone chargée positivement. Inversement, l'atome chargé positivement rejoint la couche chargée négativement : cela crée un flux de courant continu.

### 5.2.2 Modèle de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à celui d'une source de courant shuntée par une diode (voir figure 5.2). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_p$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule.

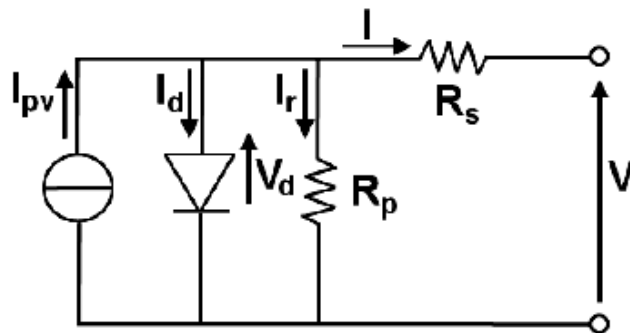
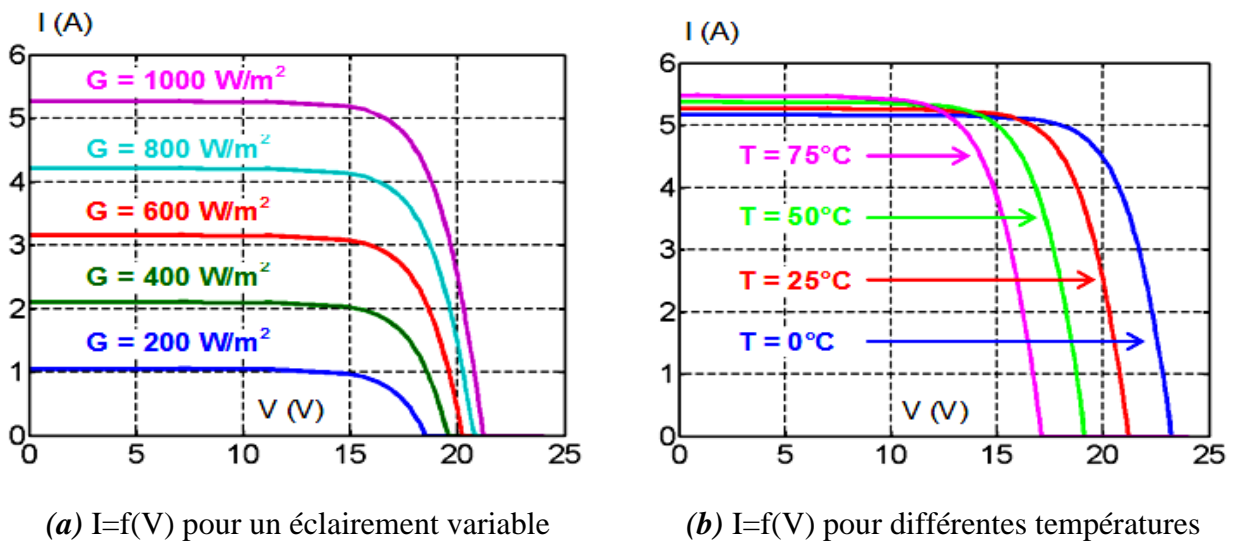


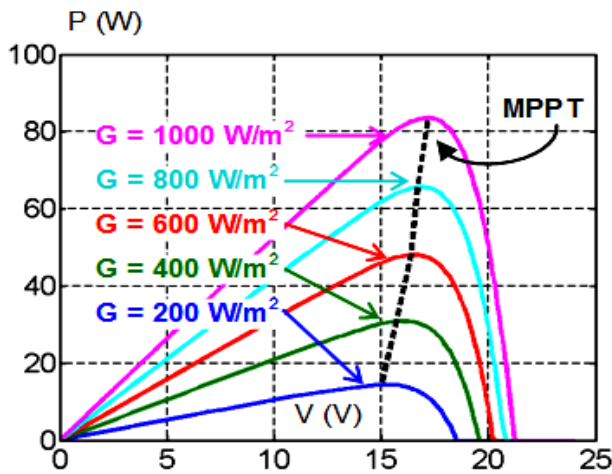
Figure 5.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

### 5.2.3 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

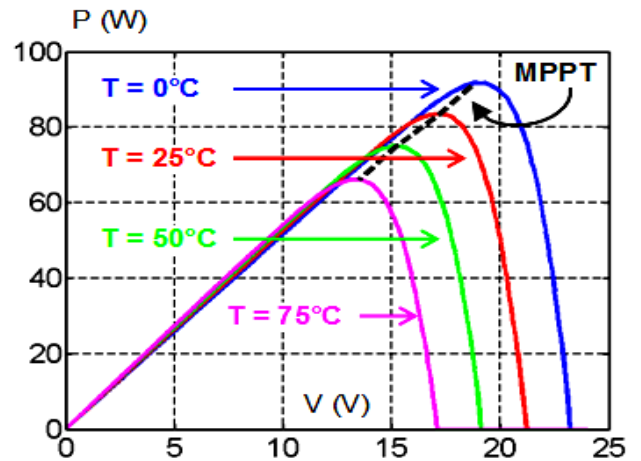
La figure 5.3 illustre l'évolution du courant  $I$  et de la puissance  $P$  en fonction de la tension  $V$  pour différentes valeurs d'ensoleillement  $G$  et de la température  $T$ .







(c)  $P=f(V)$  pour un éclairement variable



(d)  $P=f(V)$  pour différentes température

**Figure 5.3** Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

- La figure 5.3 (a) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$ . À une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit-ouvert est une fonction logarithmique.
- La figure 5.3 (b) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet du changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit-ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit-ouvert diminue. Par conséquent, la puissance maximale du générateur subit une diminution.
- La figure 5.3 (c) représente la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$  et l'influence de la température sur la caractéristique  $P(V)$  du générateur illustré sur la figure 5.3 (d).

**- Le point de puissance maximal (MPPT)**

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés est assez difficile. En effet, coté source pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement et de la température. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions données, c'est-à-dire que le point de puissance maximale est recherché (MPPT : Maximum

Power Point Tracking) pour la caractéristique puissance en fonction de la tension (voir figure 5.3 (c) et 5.3 (d)).

#### **5.2.4 Intégration des supercondensateurs dans les systèmes hybrides**

Récemment, les supercondensateurs ont été intégrés dans des architectures hybrides comprenant une source photovoltaïque avec d'autres sources d'énergies renouvelables. La gestion d'un système hybride de stockage batterie/supercondensateurs de l'énergie photovoltaïque a été simulée pour différents profils de charge par Glavin et Hurley [89]. Un système composé de deux sources (générateur photovoltaïque et le réseau) et d'un stockage batterie/supercondensateurs a été modélisé par Lagorse et al. [90]. Thounthong et al. ont étudié la gestion d'une source de courant électrique constituée d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible à l'hydrogène et d'un module de supercondensateurs pour laquelle une gestion adéquate des durées a été trouvée pour se rapprocher des consignes de puissance voulues [91]. L'intégration dans les véhicules d'unités de stockage d'énergie électrique (batterie, supercondensateurs, volants d'inertie et réservoir d'hydrogène) et des unités de production d'énergie (piles à combustible, cellules photovoltaïques, générateur thermoélectrique de l'automobile et de freinage régénératif) a été passée en revue par Tie et Tan [92]. Burnett et Borle ont montré qu'en combinant batteries et supercondensateurs dans un véhicule électrique solaire avec pile à combustible, l'adjonction de la source photovoltaïque et du système de stockage permettait de réduire les quantités d'hydrogène nécessaires et de minimiser l'investissement, la consommation et le poids du véhicule [93].

#### **5.2.5 Asymétrie charge/décharge**

Un système de conversion d'énergie comprend un moyen de stockage ayant une capacité énergétique. L'asymétrie entre la charge et la décharge est souvent rencontrée lors d'une l'application de stockage [83]. Par conséquent, une stratégie d'équilibrage est nécessaire [79,84]. Certaines technologies sont facilement propices à optimiser leurs caractéristiques pour ajuster leurs "constantes de temps" en fonction de l'application. C'est le cas des batteries au plomb ou d'une station de transfert d'énergie par pompage. Cependant, les dispositifs rapides tels que les supercondensateurs et les volants d'inertie sont plus difficiles à appréhender pour répondre aux exigences de sortie [85] et ont besoin d'une gestion prudente notamment lorsque le stockage hybride est mis en œuvre [86]. Il est important de maintenir un rendement élevé pour le stockage d'énergie électrique pour avoir une optimisation globale de

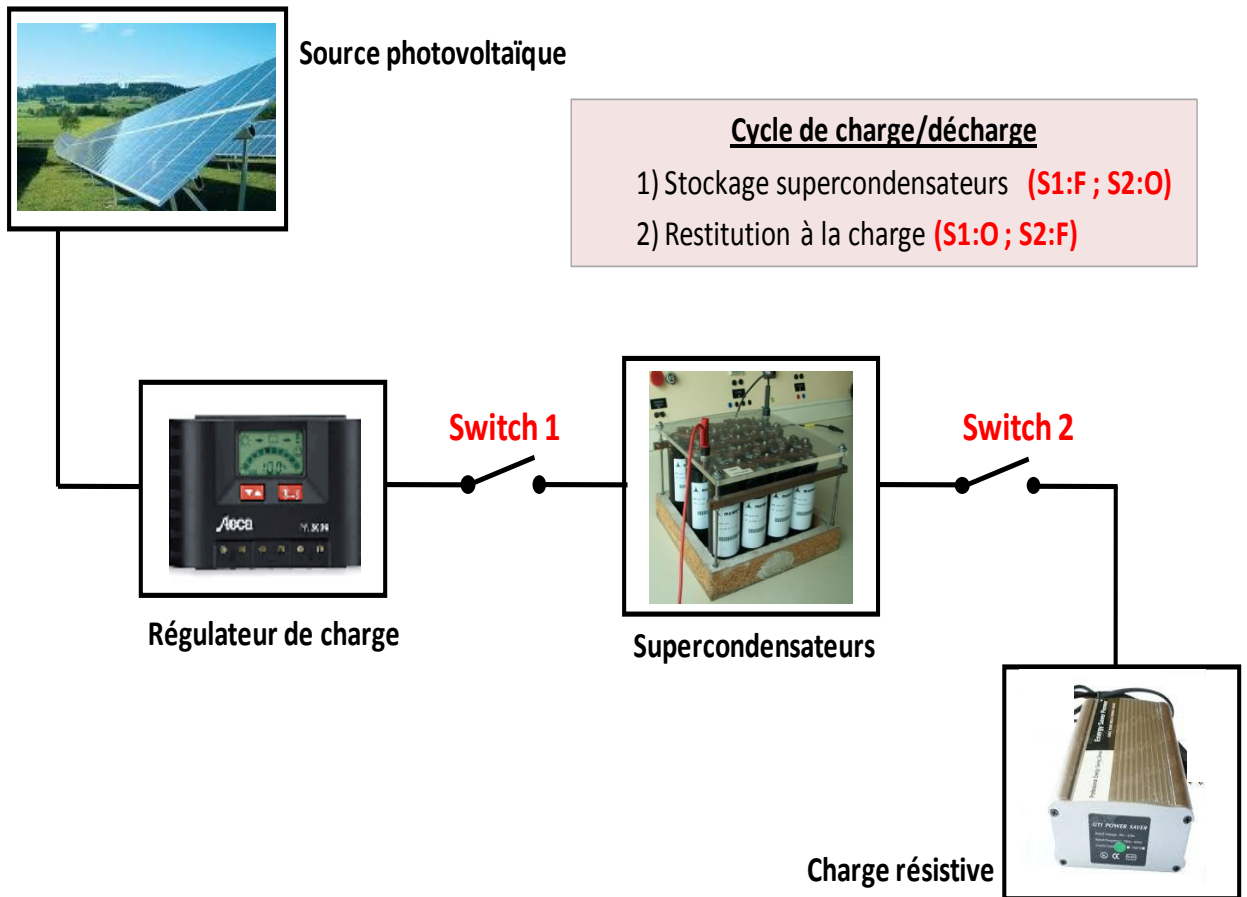
la source de production d'énergie à un élément de stockage d'énergie pour faire correspondre la durée et l'énergie restituée en aval.

Les modules photovoltaïques et les supercondensateurs sont une excellente combinaison parce que ces éléments de stockage d'énergie ont des cycles de décharge profonde. Toutefois, la dépendance de la capacité des supercondensateurs à la tension de sortie du module photovoltaïque a été signalée comme un paramètre essentiel dans le dimensionnement [87]. L'efficacité globale du système combiné est notamment affectée par les caractéristiques non idéales du module photovoltaïque et des supercondensateurs et par les variations des modes de commutation. La tension de sortie et la puissance dépendent fortement de la consommation de courant avec de grandes variations à partir du début du pic de la décharge à la fin de la décharge profonde. Par ailleurs, le courant optimal qui maximise la puissance est lié également aux changements des conditions environnementales [88]. Les supercondensateurs peuvent en effet être soumis à des changements très fréquents de caractéristiques de charge et de décharge lors des intermittences de la source.

## **5.3 Modélisation de la chaîne de conversion**

### **5.3.1 Chaîne de conversion**

Dans notre étude, un système de conversion d'énergie combinant un module photovoltaïque et un pack de supercondensateurs est considéré (figure 5.4). La commande de la charge et de la décharge des supercondensateurs est réalisée à l'aide d'un régulateur de charge. Le système restitue l'énergie électrique dans une charge résistive. L'optimisation du stockage de l'énergie photovoltaïque de sa production à sa restitution est recherchée en utilisant une approche par simulation. Le modèle d'un système de stockage d'énergie photovoltaïque par supercondensateurs est utilisé. Cette chaîne de conversion d'énergie solaire a été validée auparavant grâce à la bonne concordance avec les résultats expérimentaux sous conditions extérieures [107,108].



**Figure 5.4** Éléments de la chaîne de conversion de l'énergie solaire

L'efficacité globale du système pour maximiser l'énergie transférée à partir de la source photovoltaïque à la charge résistive par l'intermédiaire du pack de supercondensateurs est étudiée. La quantité d'énergie stockée par les supercondensateurs fournie par un module photovoltaïque est quantifiée afin de trouver les réglages optimaux de commutation pour le déclenchement de la charge /décharge et la restitution d'énergie avec un minimum de perte pour une condition climatique donnée (irradiance solaire et de la température). Après une description du modèle, la charge/décharge des supercondensateurs est simulée pour différents seuils haut et bas de tension pour le déclenchement des interrupteurs de commande. Les résultats en temps et en énergie sont présentés et discutés.

### 5.3.2 Éléments de la chaîne

#### 5.3.2.1 Circuit équivalent

Le circuit équivalent de la chaîne de conversion est donné par la figure 5.5.

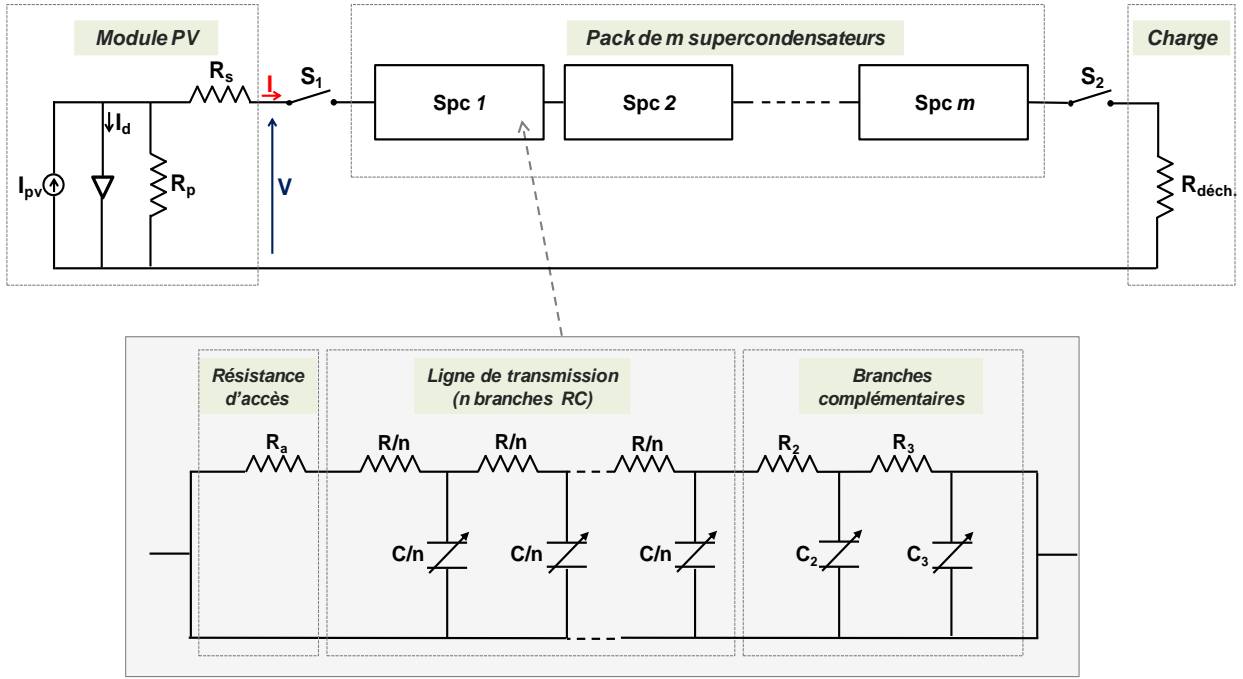


Figure 5.5 Circuit équivalent du système de stockage de l'énergie photovoltaïque

Dans le circuit équivalent à une diode d'un module photovoltaïque, le courant  $I$  et la tension  $V$  sont reliés par:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (5.1)$$

où le deuxième terme est le courant de la photodiode,  $I_{pv}$  et  $I_0$  sont respectivement le courant photoélectrique et celui de saturation de la diode qui sont tous les deux fonctions de la température [109]:

$$\begin{cases} I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \\ I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_v \cdot \Delta T}{a \cdot V_t}\right) - 1} \end{cases} \quad (5.2)$$

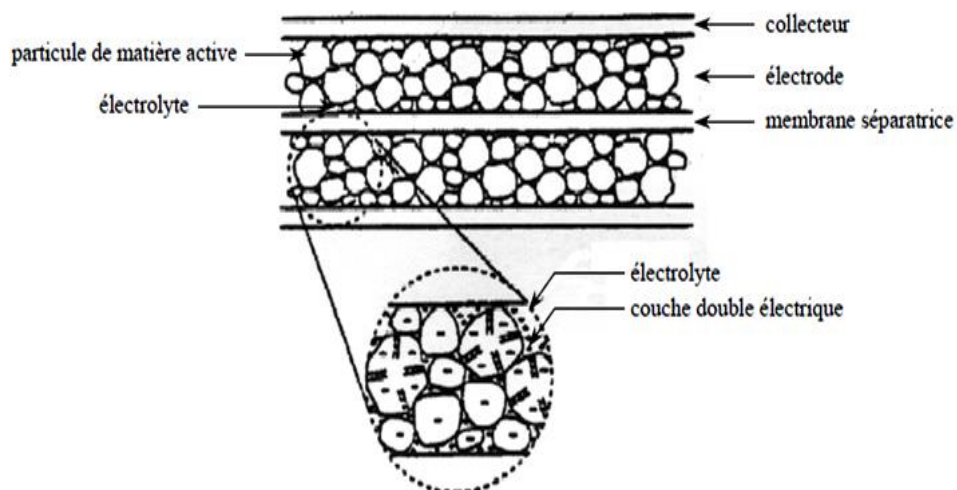
où  $\Delta T = T - T_n$  avec  $T$  la température de jonction,  $T_n = 25^\circ\text{C}$  est la température nominale,  $G_n = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  est l'éclairement nominal et  $V_t = N_s \cdot k \cdot t / q$  est la tension thermique.

Le circuit équivalent de cellules RC en cascade est utilisé pour les supercondensateurs. Le circuit de supercondensateur multibranches est composé de cellules contenant des résistances et condensateurs montées en parallèle comme représenté sur la figure 5.5 [99,105]. Ce circuit équivalent est donc élaboré, à la différence d'un modèle de RC simple donnant un

comportement global, avec différentes fenêtres temporelles qui permettent de reproduire le comportement non idéal des supercondensateurs.

Un supercondensateur comprend deux électrodes poreuses imprégnées d'électrolyte, chacune connectée à un collecteur métallique et séparées l'une de l'autre par la membrane poreuse isolante pour assurer la conduction ionique (voir figure 5.6). Différentes résistances dans le circuit sont la conséquence de la résistivité du matériau de l'électrode de la résistivité de l'électrolyte qui dépend de la concentration et de la mobilité des porteurs de charge libres, de la taille des pores qui influence notamment la qualité du contact électrique entre le matériau ayant des particules actives, l'emplacement de la concentration en ions de l'électrolyte et aussi de la technologie d'assemblage (imprégnation des électrodes, la qualité des contacts collecteur / électrode).

Pour les temps courts, le comportement est comparable à celle d'une ligne de transmission qui a une résistance totale  $R$ , une capacité non linéaire dépendante de la tension  $C(V)$  et une résistance d'accès  $R_a$ . Il est nécessaire de considérer 15 branches pour la ligne de transmission afin de reproduire avec exactitude le comportement de tension à la charge et à la décharge [105,106]. La ligne de transmission est complétée par deux autres branches complémentaires pour prendre en considération la redistribution des charges et l'auto-décharge qui sont des phénomènes aux temps longs.



**Figure 5.6** Structure d'un supercondensateur

Enfin, une résistance est utilisée comme charge et les fonctions du régulateur sont assurées par deux commutateurs.

### **5.3.2.2 Dimensionnement**

Un panneau photovoltaïque Kyocera KC200GT et un pack de supercondensateurs Maxwell PC7223 sont considérés. La tension nominale d'un supercondensateur est de 2,5 V. La tension en circuit ouvert du module photovoltaïque est de 32,9 V ; par conséquent 14 supercondensateurs sont mis en série. Les caractéristiques sont tirées de la fiche technique du fabricant du panneau photovoltaïque et des données de la caractérisation effectuée par Belhachemi. Les grandeurs électriques des différentes branches sont déterminées par des essais de charges partielles à courant constant et de décharge pour les branches complémentaires [99,105] (tableau 5.1). Les résistances série  $R_s$  et parallèle (shunt)  $R_p$  ont été calculés par un ajustement numérique permettant de retrouver le point de puissance maximale expérimentale [92]. La résistance de décharge  $R_{déch}$  est de 0,1  $\Omega$ . L'implémentation et les simulations ont été réalisées dans l'environnement SimPowerSystems de Matlab/Simulink [108].

**Tableau 5.1** Caractéristiques du modèle

**Module photovoltaïque Kyocera KC200GT**

---

$I_{sc} = 8.21$  A  
 $V_{oc} = 32.9$  V  
 $P_{max,e} = 200.143$  W  
 $N_s = 54$   
 $K_i = 0.0032$  A.K<sup>-1</sup>  
 $K_v = -0.1230$  V.K<sup>-1</sup>  
 $R_p = 415.405$   $\Omega$   
 $R_s = 0.221$   $\Omega$   
 $a = 1.3$

**Supercondensateur Maxwell PC7223**

---

$R_a = 0.5$  m $\Omega$   
 $R = 1.1$  m $\Omega$   
 $C(V) = -196.4 V^2 + 925.4 V + 1976.8$   
 $R_2 = 100$  m $\Omega$   
 $C_2(V) = -8.9286 V^2 + 40.2643 V + 88.9643$   
 $R_3 = 1$   $\Omega$   
 $C_3(V) = -1.8571 V^2 + 12.4714 V + 31$

**Résistance de décharge**

---

$R_{déch.} = 0.1$   $\Omega$

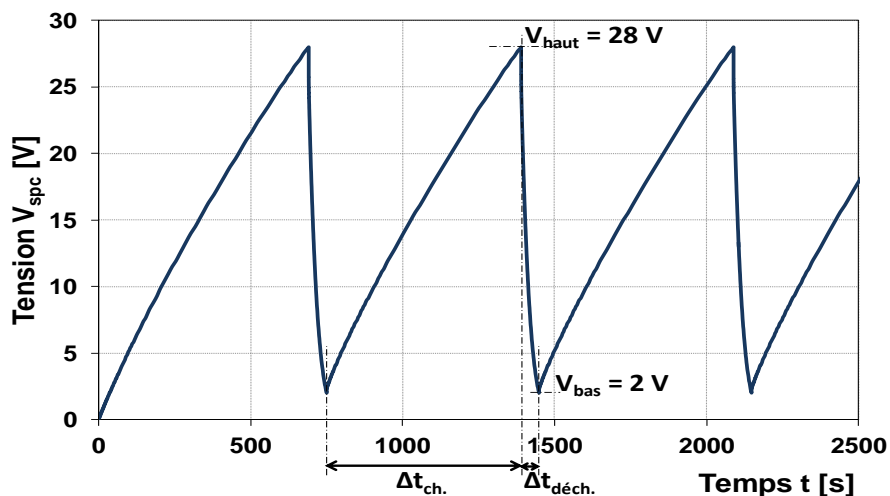
### **5.3.2.3 Simulations**

Les cycles de charge/décharge successives sont simulées pour un ensemble de seuils de tension ( $V_{bas}$ ,  $V_{haut}$ ) autorisant le déclenchement des commutateurs  $S_1$  et  $S_2$ . Nous avons choisi  $V_{bas}$  dans l'intervalle [2V, 14V] et  $V_{haut}$  dans l'intervalle [20V, 28V]. Les pertes d'énergie dans le transfert énergétique lors de la charge et de la décharge sont implicitement

prises en compte avec les résistances série et parallèle  $R_s$  et  $R_p$  pour le module photovoltaïque et par la résistance  $R$  de la ligne de transmission des supercondensateurs et les résistances dans les branches complémentaires pour la redistribution et l'auto-décharge.

### 5.3.3 Contrôle des cycles de charge/décharge

L'ensemble du système est modélisé par un circuit électrique équivalent constitué du circuit à une diode pour le générateur photovoltaïque et du circuit multibranche pour le supercondensateur. La figure 5.5 fournit le modèle éclaté pour un seul supercondensateur afin d'afficher de manière claire les différentes branches RC. Les supercondensateurs sont en effet mis en série afin de faire correspondre la tension du pack de supercondensateurs à la tension du module photovoltaïque. Un système de commande électronique doit être utilisé pour les fonctions de gestion, pour contrôler la conversion de l'énergie (courant et/ou tension) et pour assurer la sécurité (contrôle, équilibre entre les éléments ...). Il permet d'informer l'utilisateur sur l'état normalisé de charge (SOC : State-Of-Charge), ce dernier est couramment utilisé à l'encontre de l'état d'énergie (SOE : State-Of-Energie) qui est plus difficile à interpréter directement. Dans notre modèle, les deux commutateurs,  $S_1$  et  $S_2$ , du système de commande permettent la gestion de la charge/décharge dans la charge résistive  $R_{déch.}$ . L'interrupteur  $S_1$  est fermé pendant la charge jusqu'à ce que la tension du pack de supercondensateurs atteigne le seuil de tension supérieur  $V_{haut}$  alors que  $S_2$  est ouvert. Lors de la décharge, la tension du pack de supercondensateurs décroît jusqu'au seuil inférieur de tension  $V_{bas}$ , l'interrupteur  $S_2$  est fermé tandis que l'interrupteur  $S_1$  est ouvert. La figure 5.7 présente un exemple d'évolution de la tension pour des cycles successifs de charge/décharge avec ( $V_{bas}$ ,  $V_{haut}$ ) fixé à (2V, 28V). La durée de charge est notée  $\Delta t_{ch.}$  et celle de décharge  $\Delta t_{déch.}$ .



**Figure 5.7** Exemple d'évolution de la tension du pack de supercondensateurs pour différents cycles successifs de charge/décharge



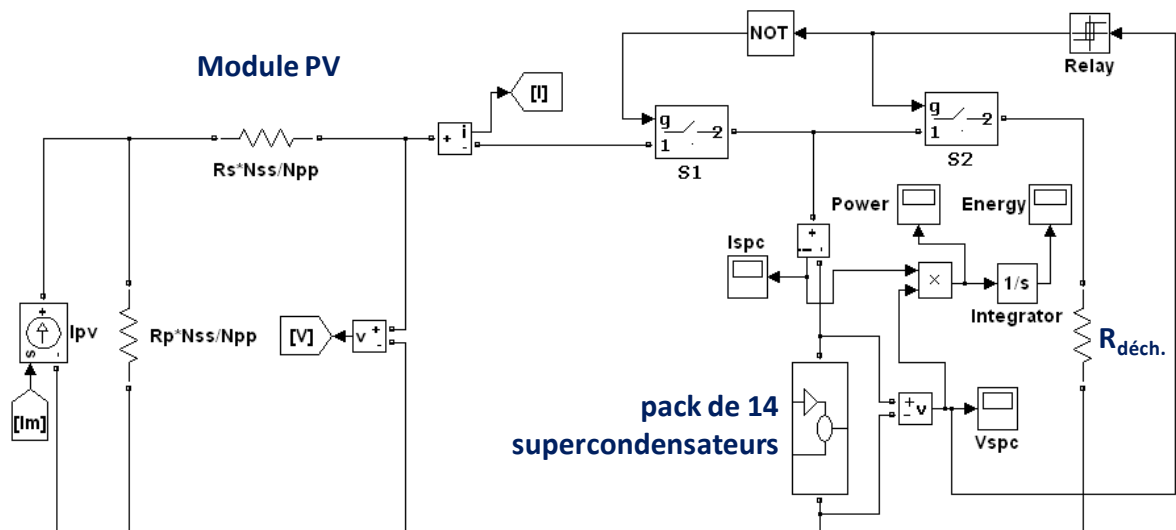
## 5.4 Exploitation

### 5.4.1 Durée de cycle

Nous étudions le transfert d'énergie et les durées pour un cycle de charge/décharge. L'énergie stockée  $E_{ch}$ . est quantifiée en intégrant le produit de la tension allant de  $V_{bas}$  à  $V_{haut}$  par le courant du pack de supercondensateurs sur la durée de charge  $\Delta t_{ch}$ . L'énergie restituée  $E_{déch}$ . dans la charge résistive est calculée en intégrant le produit de la tension décroissante du pack de supercondensateurs de  $V_{haut}$  à  $V_{bas}$  par le courant de sortie sur la durée de décharge  $\Delta t_{déch}$ . Pour un cycle donné, ces énergies ont pour expressions :

$$\begin{cases} E_{ch} = \int_0^{\Delta t_{ch}} V(t).I(t)dt \\ E_{disch} = \int_0^{\Delta t_{déch}} V(t).I(t)dt \end{cases} \quad (5.3)$$

L'énergie mise en jeu lors de la charge et de la décharge des supercondensateurs est calculée avec un intégrateur dans le modèle Simulink (figure 5.8). Les durées de charge/décharge  $\Delta t_{ch}$ . et  $\Delta t_{déch}$ . d'un cycle sont déterminées lorsque les relais commutent dès lors que les seuils de tension sont atteints.

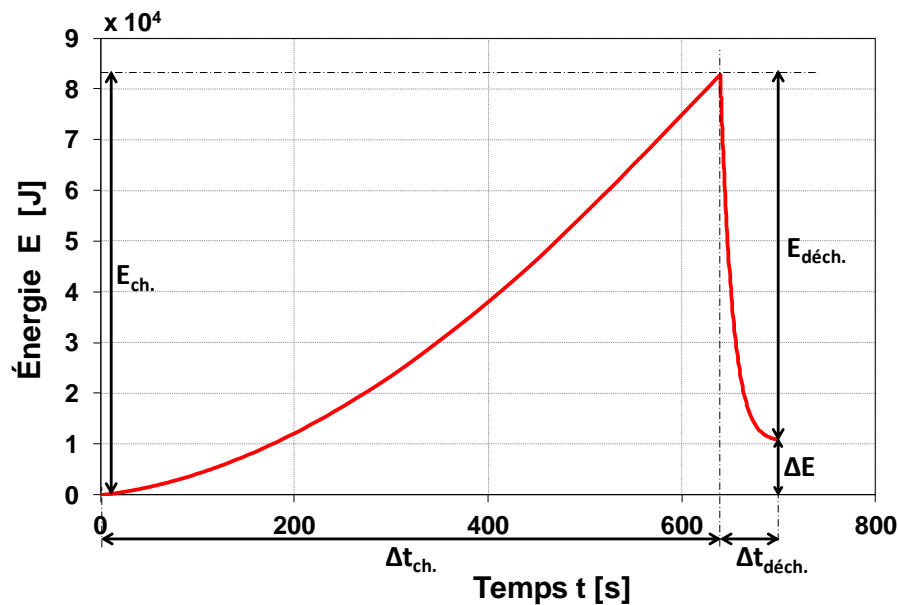


**Figure 5.8** Modèle Simulink avec un intégrateur pour calculer le transfert énergétique

Les simulations des cycles de charge/décharge ont été effectués pour les conditions de fonctionnement nominales du module photovoltaïque: éclairement solaire de  $1000 \text{ W.m}^{-2}$  et température de cellule de  $25^\circ\text{C}$  (conditions standards de test, STC). Les caractéristiques des

supercondensateurs affichées dans le tableau 5.1 ont été déterminées à température ambiante d'environ 20°C qui est dans la même grandeur que la température de cellule.

La condition de température est essentielle parce que la capacité des supercondensateurs varie fortement avec la température [107,110]. Nous présentons ici la méthode et les résultats de ces conditions fixes qui étaient celles de la caractérisation des paramètres du modèle. D'autres valeurs pour l'éclairement et la température de la cellule peuvent être introduites dans l'équation (5.1). Les caractéristiques du circuit multibranche doivent être connues selon la température. Ceci peut être réalisé en prenant en compte les variations en fonction de la température des résistances et capacités [110] ou par caractérisation expérimentale à des températures définies. Dans le cas de l'éclairement variable et la température, les profils peuvent être entrés dans le modèle. La figure 5.9 montre l'évolution des énergies  $E_{ch.}$  et  $E_{déch.}$  pour un cycle de charge/décharge dans le cas de  $V_{bas} = 2 \text{ V}$  et  $V_{haut} = 28 \text{ V}$  (voir figure 5.7 pour l'évolution de la tension correspondante).



**Figure 5.9** Exemple de l'énergie mise en jeu lors d'un cycle de charge/décharge des supercondensateurs ( $V_{bas} = 2 \text{ V}$  et  $V_{haut} = 28 \text{ V}$ ).

Les supercondensateurs ne restituent pas intégralement l'énergie stockée en raison des pertes internes irrémédiables modélisées par les différentes résistances [111]. Nous soulignons ici l'asymétrie entre la charge et la décharge en calculant la différence  $\Delta E = E_{ch.} - E_{déch.}$ . Contrairement à un circuit simple avec un condensateur, les supercondensateurs présentent des comportements imparfaits reproduits finement avec le modèle choisi grâce aux résistances supplémentaires en raison de la résistivité de la ligne de transmission, de la redistribution des charges (branche  $R_2C_2$ ) et de l'auto-décharge (branche  $R_3C_3$ ). Pendant la charge, les

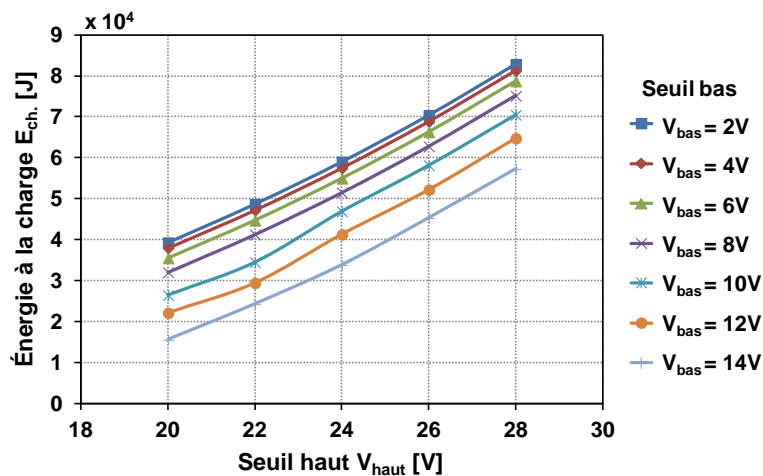
résistances freinent l'arrivée d'électrons dans les condensateurs. Lors de la décharge dans la résistance  $R_{déch.}$ , les supercondensateurs se comportent comme un générateur de courant avec une résistance interne, dans laquelle une partie de l'énergie est dissipée. Par conséquent, l'énergie restituée par les supercondensateurs à la résistance de décharge est inférieure à celle nécessaire pour les charger, même si la même tension de seuil est atteinte à la fin de la décharge (figure 5.7).

### 5.4.2 Rendement sur cycle énergétique

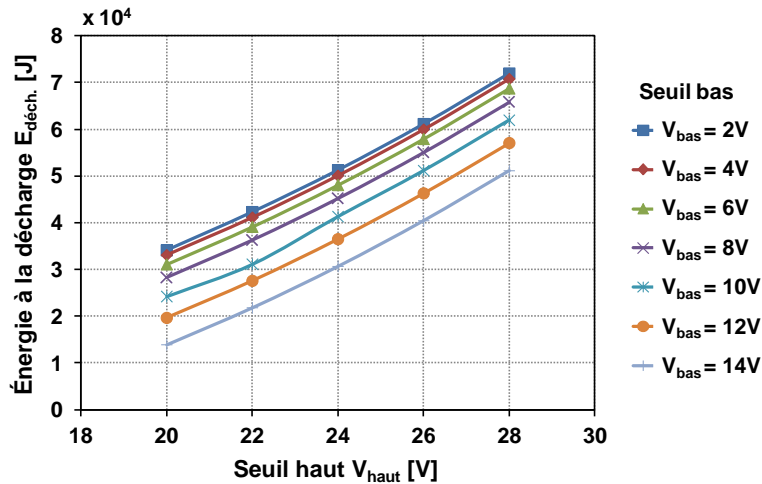
Afin d'apprécier le déséquilibre de l'énergie, les rendements énergétiques sur cycle  $\eta_e$  ont été calculés, soit le rapport de l'énergie restituée par celle stockée [82] pour chaque couple de seuil de tension ( $V_{low}$ ,  $V_{high}$ ) commutant les interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$ :

$$\eta_e = \frac{E_{disch.}}{E_{ch.}} \quad (5.4)$$

Les énergies lors de la charge/décharge sont tracées sur un graphique en deux dimensions (figure 5.10). Nous remarquons comme attendu que l'énergie fournie par le pack de supercondensateurs est inférieure. Le rendement énergétique sur cycle, fournie par la figure 5.11, est de l'ordre de 86,5% à 93,5%, ce qui est bien dans l'intervalle de performance des supercondensateurs [85%, 95%] [112]. La plupart des valeurs sont de l'ordre 87,5%, mais la valeur optimale est relativement bien plus élevée. Nous pouvons observer que le rapport optimal  $\eta_{e,max} = 93,5\%$  est obtenu pour un seuil bas  $V_{bas} = 12\text{ V}$  et un seuil élevé  $V_{haut} = 22\text{ V}$ . Avec ces seuils de tension, les supercondensateurs rendent le plus d'énergie par rapport à l'énergie stockée.



a)



b)

Figure 5.10 Énergies nécessaires pour la charge (a) et celles fournies à la décharge (b) pour un cycle

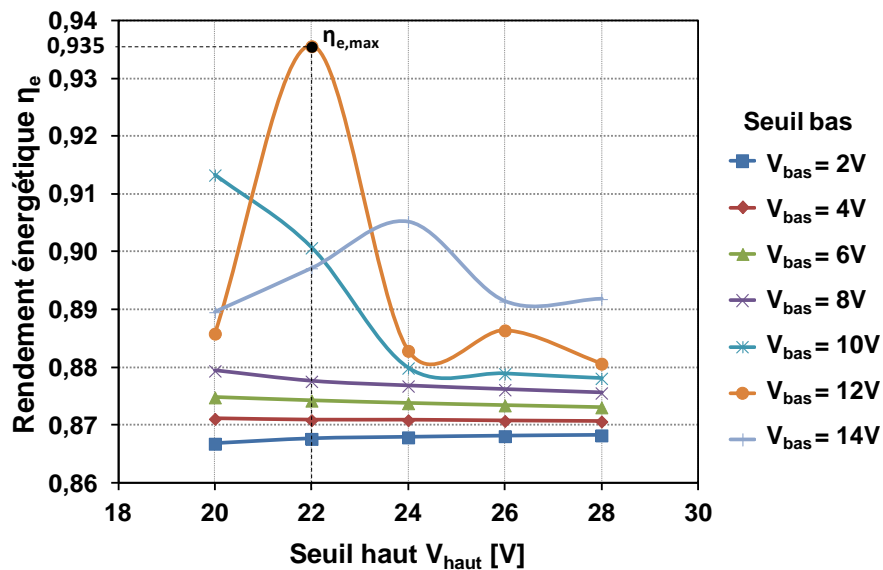


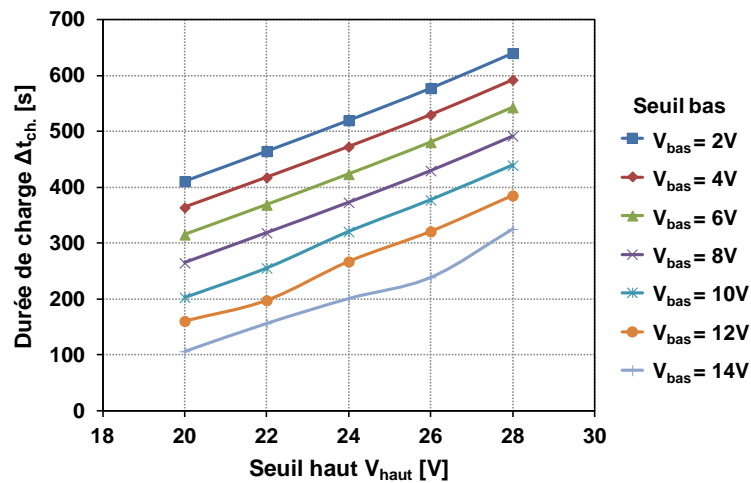
Figure 5.11 Rendements énergétiques sur cycle

### 5.4.3 Rendement sur cycle temporel

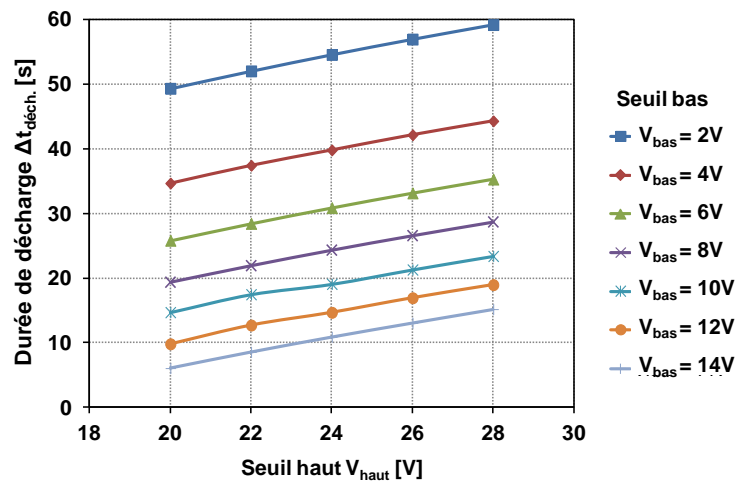
Nous nous demandons si les seuils de tension de commande sont les mêmes d'un point de vue temporel. Le ratio sur cycle  $\eta_t$  a été déterminé pour les mêmes couples de seuil de tension pour la commande de charge/décharge ( $V_{bas}$ ,  $V_{haut}$ ) :

$$\eta_t = \frac{\Delta t_{disch.}}{\Delta t_{ch.}} \tag{5.5}$$

Les résultats des durées obtenus sont reportés sur la représentation graphique de la figure 5.12. La décharge des supercondensateurs est de l'ordre de quelques dizaines de secondes, ce qui est conforme, alors que la durée du temps de charge est de l'ordre de quelques centaines de secondes. Les durées de charge varient de manière presque linéaire et augmentent lorsque la tension de seuil élevée devient plus grande pour les différents seuils bas. Plus la différence de tension  $V_{\text{haut}} - V_{\text{bas}}$  augmente, plus la charge et la durée de décharge deviennent importantes. Lorsque le seuil bas augmente, la durée de charge/décharge diminue.



a)



b)

Figure 5.12 Durées de charge/décharge

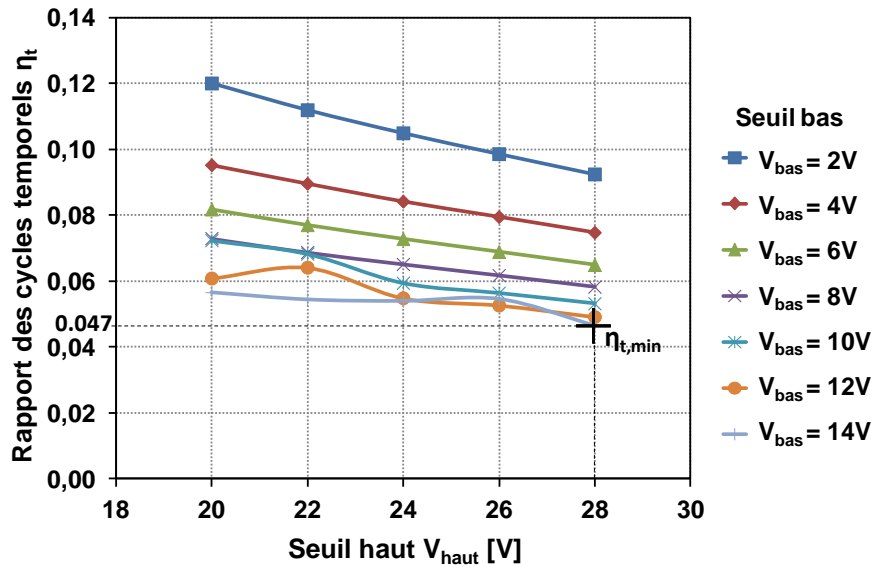
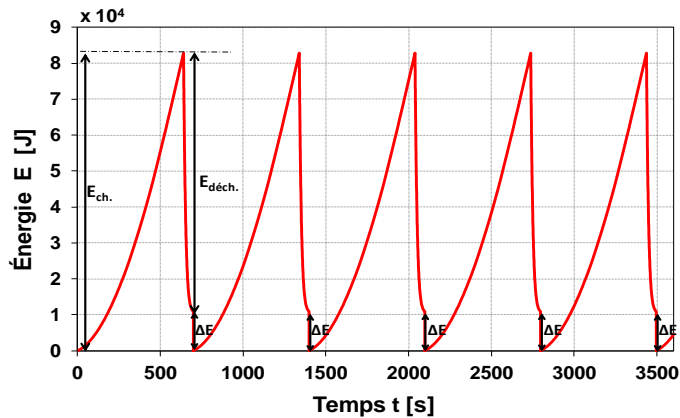


Figure 5.13 Rapports des cycles temporels

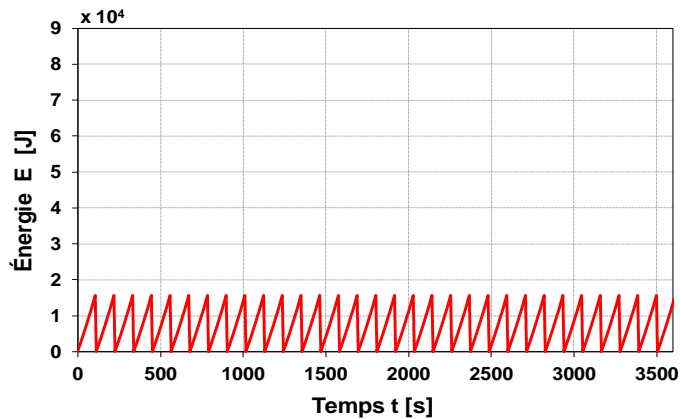
Les seuils optimaux sont obtenus lorsque le rapport de la durée de décharge/charge est minimal:  $\eta_{t, \min} = 0,047$  lorsque  $V_{bas} = 14 \text{ V}$  et  $V_{haut} = 28 \text{ V}$  (figure 5.13). Les seuils de commutation pour la durée de cycle minimale sont différents de ceux de l'énergie optimale. Par conséquent, nous disposons de deux jeux de valeurs optimales de seuils, l'un pour la durée et l'autre pour l'énergie. Nous devons maintenant déterminer les seuils qui permettent le transfert d'énergie maximale avec une durée minimale. Ainsi, pour définir un critère, nous avons décidé de calculer l'énergie qui serait stockée et redonnée au cours d'une utilisation d'une heure de cycles successifs.

#### 5.4.4 Seuils optimaux de déclenchement

Le nombre de cycles  $N$  en une heure est déterminé par la connaissance de la durée de cycle de la figure 5.12. Ainsi, la différence d'énergie cumulée  $N \cdot \Delta E$  peut être obtenue. La situation dans laquelle les seuils permettent la différence d'énergie cumulée minimale avec des quantités raisonnables d'énergie correspond au transfert optimal à la fois pour l'énergie et la durée. Figure 5.14 cas 1, quand une grande différence de tension entre les seuils est considérée, un petit nombre de cycles se produisent mais avec un transfert d'énergie important. Figure 5.14 cas 2, la différence de seuil de tension est faible, moins d'énergie est échangée, mais une multitude de cycles est réalisée.



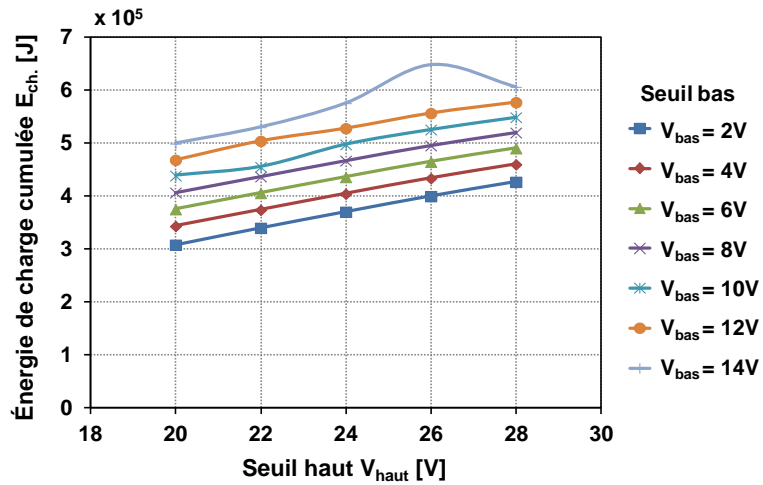
**Cas 1**  
 $(V_{\text{bas}} = 2 \text{ V} ; V_{\text{haut}} = 28 \text{ V})$   
 $E_{\text{ch.}} = 82851 \text{ J} ; E_{\text{déch.}} = 71933 \text{ J}$   
 $N = 5 \text{ cycles}$



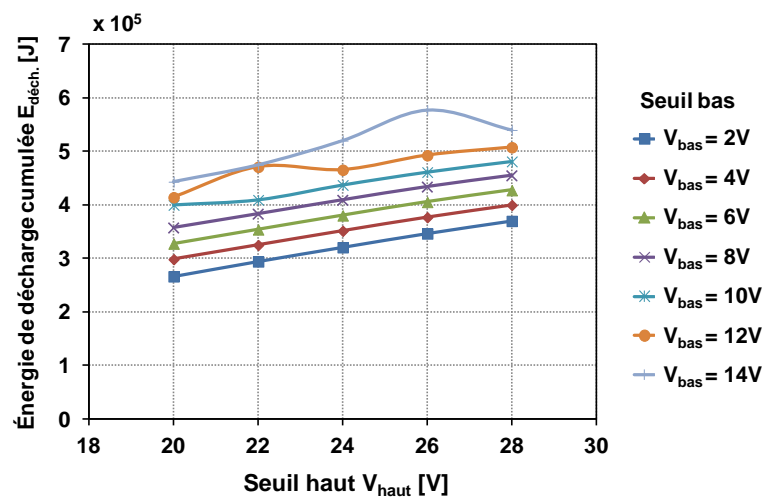
**Cas 2**  
 $(V_{\text{bas}} = 14 \text{ V} ; V_{\text{haut}} = 20 \text{ V})$   
 $E_{\text{ch.}} = 15599 \text{ J} ; E_{\text{déch.}} = 13876 \text{ J}$   
 $N = 32 \text{ cycles}$

**Figure 5.14** Echange d'énergie lors de cycles successifs pendant une heure

La quantité d'énergie stockée et déchargée pour une heure de cycles successifs de charge/décharge est fournie figure 5.15. La différence minimale de l'énergie cumulée est trouvée pour le même couple de seuils optimaux permettant le meilleur rendement énergétique sur cycle ( $V_{\text{bas}} = 12 \text{ V}$  et  $V_{\text{haut}} = 22 \text{ V}$ ), comme souligné figure 5.16. Ainsi, ces valeurs de seuils sont confortées dans ce cas précis parce que le rendement sur cycle est très supérieur  $\eta_{e,\text{max}} = 93,5\%$  par rapport aux autres qui sont de l'ordre de  $87,5\%$ . Si les rendements avaient été tous proches les uns des autres, l'optimisation aurait certainement été trouvée avec un compromis.



a)



b)

Figure 5.15 Échanges d'énergie pour des cycles successifs pendant une heure

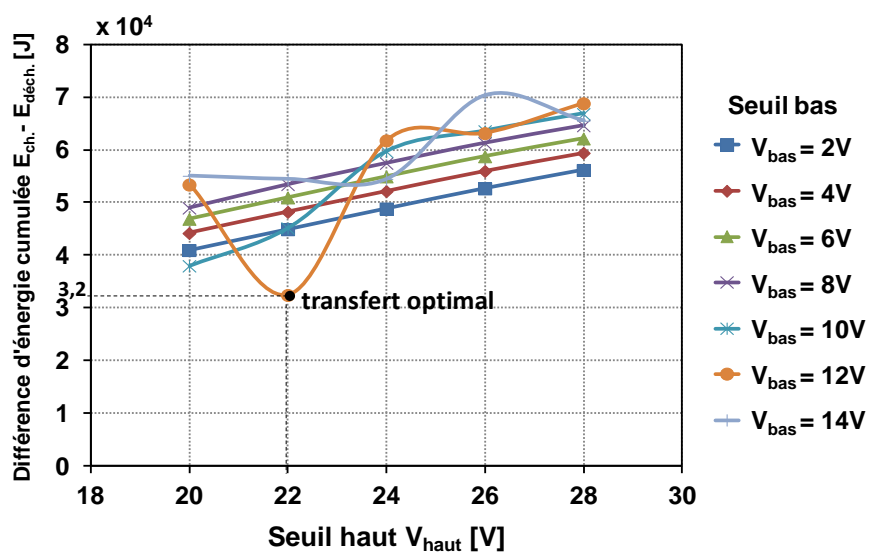


Figure 5.16 Détermination du minimum de perte



En pratique, les supercondensateurs ne sont généralement pas utilisés pour assurer des cycles successifs de charge/décharge. Cette considération ne correspond qu'à un critère pour trouver le transfert d'énergie optimal. Néanmoins, les cycles de charge/décharge successifs sont rencontrés dans certaines applications. C'est le cas des essais de charge/décharge galvanométriques destinés à l'amélioration de la structure et de la performance des supercondensateurs [113] où la méthode proposée ici pourrait être mise à profit pour connaître la meilleure restitution d'énergie possible. Dans les applications liées aux véhicules, on retrouve les cycles successifs de charge/décharge lors d'un freinage, la différence  $\Delta E$  reste stockée dans les supercondensateurs ce qui provoque l'échauffement des supercondensateurs [114]. L'augmentation de la température lors des cycles successifs pourrait ainsi être mieux expliquée et minimisée avec la méthode actuelle [115]. Pour l'éclairage public, une fois que les supercondensateurs sont chargés au moyen des cellules photovoltaïques, il s'auto-décharge faiblement pendant le reste de la journée avant de fournir de l'énergie aux lampes la nuit [80]. En ayant une vision large des cycles de charge/décharge sur une année, cela revient à des cycles répétés dont il convient d'optimiser les seuils de déclenchement et de réduire l'auto-décharge. Cela pourrait être réalisé avec l'approche proposée en prenant en compte un ensemble de valeurs d'éclairagements et de températures représentatifs.

## **5.5 Conclusion**

Dans une chaîne de conversion, les comportements et les pertes non linéaires ont un impact sur le transfert d'énergie depuis la source vers la charge via un moyen de stockage, ce qui peut entraîner une asymétrie entre la charge et la décharge. Une approche pour déterminer l'efficacité énergétique optimale d'un pack de supercondensateurs alimenté par un module photovoltaïque a été présentée. Un modèle multibranches pour les supercondensateurs a été utilisé pour calculer les durées de charge/ décharge et les énergies en jeu. Les valeurs des seuils de tension pour le déclenchement des cycles ont été testées au moyen de simulations et les valeurs optimales des seuils de tension ont été mises en évidence, celles permettant de connaître le meilleur rendement sur cycle à la fois temporellement et énergétiquement. La différence d'énergie est due aux pertes de la ligne de transmission, la redistribution des charges et aux fuites dans les supercondensateurs qui sont toutes prises en compte dans le modèle, ainsi qu'aux comportements électriques non linéaires du module photovoltaïque. Avec cette approche, la commande peut être programmée pour la restitution optimale de la charge en fonction de l'ensoleillement et de la température.

*Conclusion Générale*  
*et*  
*Perspectives*

## **Conclusion générale et perspectives**

Les travaux présentés dans cette thèse concernent, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'énergie électrique à partir de ressources renouvelables intermittentes (photovoltaïque-éolienne) pour des applications en sites isolés ou bien intégrés aux réseaux électriques. Les premiers objectifs ont été d'effectuer un état de l'art sur les énergies renouvelables, d'évaluer les potentialités de chaque structure et de proposer des solutions aux nouvelles contraintes imposées aux générateurs éoliens et photovoltaïques en termes de qualité d'énergie fournie et du stockage d'électricité.

Les machines synchrones à aimants permanents apportent une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables ; ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques notamment une durée de vie importante, un rendement élevé et une maintenance réduite.

La structure de la GSAP à intégrer dans le système de conversion d'énergie éolienne envisagé a été modélisée de façon très poussée. Par la suite, des modèles de simulation pour la source éolienne et photovoltaïque ainsi que pour les éléments d'interconnexion avec la charge ont été développés sous l'environnement MATLAB/ *Simulink*.

Pour la chaîne de conversion d'énergie éolienne, on a représenté le modèle avec tous ses éléments : rotor éolien, générateur à aimants permanents, redresseur non commandé, onduleur à MLI et le filtre LC. Pour la maximisation de l'énergie contenue dans le vent, la commande adoptée pour la chaîne éolienne ont été basé sur la technique de recherche du point optimal de puissance MPPT, adoptée ici est basée sur l'architecture et la connaissance de la caractéristique de la voilure (via la vitesse réduite  $\lambda$ ).

Les résultats des simulations réalisées à partir du système proposé montrent clairement l'intérêt du filtre LC qui joue un rôle prépondérant dans la fourniture d'énergie propre et de bonne qualité à la charge électrique avec le filtrage des harmoniques.

Les supercondensateurs sont un moyen de stockage de l'énergie électrique permettant de satisfaire des appels de puissance électrique très importants sur des durées de l'ordre de 1 à 10 secondes, voire moins. Leur intégration dans des systèmes de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque devient très enrichissante en raison de leur complémentarité.

Un modèle de stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateur ayant un comportement électrique non linéaire est développé pour connaître les seuils optimaux de déclenchement de la charge et de la décharge.

Le modèle d'une chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un programme de calcul suivant l'éclairement solaire et la température, la conversion photovoltaïque des modules, le régulateur de charge/décharge, le stockage d'énergie par supercondensateurs, ainsi que la charge résistive a été établi avec une implémentation réalisée avec logiciel MATLAB/Simulink.

Pour la modélisation du module de supercondensateurs, on a choisi le modèle multibranches correspondant à une représentation équivalente sous forme d'un ensemble de cellules RC en parallèle. Celui-ci a été retenu en raison de sa robustesse et de l'intégration de la majorité des phénomènes physiques lors de la charge et la décharge.

Le modèle utilisé a été validé précédemment par le bon accord des résultats des simulations à ceux obtenus lors d'essais de charge/décharge des supercondensateurs dans une charge résistive avec un dispositif en conditions extérieures. Le modèle permet de calculer le transfert d'énergie maximal et le meilleur ratio durée de décharge/durée de charge.

Cette approche permettrait d'optimiser le transfert d'énergie entre les supercondensateurs et les panneaux photovoltaïques ainsi que dans de nombreuses applications: développement des matériaux constitutifs des supercondensateurs, énergie de freinage, éclairage.

Les résultats de simulations obtenus ont permis de montrer un bon comportement énergétique du système complet. L'utilisation de ce type de production d'énergie (photovoltaïque-éolienne) est très intéressante en site isolé, surtout pour les applications du pompage d'eau.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'enrichissement de l'ensemble du système de production d'énergie éolienne et photovoltaïque, dont le but est d'optimiser le transfert d'énergie et d'envoyer une énergie propre non polluante à la charge ou bien au réseau électrique. Parmi les perspectives envisageables, il y a :

- Les modèles utilisés peuvent être mis ensemble dans le cadre d'un système hybride de production et de stockage d'énergie, qui devient plus fiable et plus efficace.
- Utiliser des filtres actifs avec des commandes adaptatives de régulation suivant la vitesse du vent, lors de la connexion du système éolien au réseau.

- Utiliser les réseaux de neurones pour l'identification des harmoniques existants sur le réseau lors de la connexion avec le système éolien.
- Intégrer d'autres types de stockage d'énergie comme les batteries, les piles à combustibles et les volants d'inertie.
- Réaliser l'interconnexion avec d'autres sources d'énergies renouvelables pour une architecture destinée en réseau intelligent (Smart grid).

Enfin, des paramètres de vieillissement seront intéressants à introduire dans les modèles pour apprécier la diminution de performance suivant les années d'utilisation et calculer la rentabilité et la fiabilité des installations éoliennes et photovoltaïques.



# ***Références***

## Références

- [1] F. Poitiers, "Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Décembre 2003.
- [2] M. Adem, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse. Avril 2005.
- [3] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [4] A. Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse. Année 2007.
- [5] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [6] L. Leclercq, "Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes", thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [7] M. Lopez, "Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée", Thèse de doctorat de l'université de Paris-sud XI, Décembre 2008.
- [8] S. Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", Thèse de doctorat de l'université de Constantine, Juin 2010.
- [9] N. Kasbadji Merzouk, "Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie", Thèse de doctorat de l'université Abou Baker Belkaid de Tlemcen, Mai 2006.
- [10] M. Amarouayache, "Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque", Thèse de doctorat de l'université de Constantine, Mars 2014.

- [11] A. Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [12] D. H. Tran, "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne «passive» : Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Septembre 2010.
- [13] L. Croci, "Gestion de l'Énergie dans un Système Multi-Sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs", Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, Décembre 2013.
- [14] M. A. Tankari, "Système Multi-sources de Production d'Énergie Électrique", Thèse de doctorat de l'université du Havre, Décembre 2010.
- [15] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, Décembre 2004.
- [16] B. Beltran, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur", Thèse de doctorat de l'université de Bretagne occidentale, Juillet 2010.
- [17] M. Mayouf, "Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents", Thèse de doctorat de l'université de Batna, Avril 2014.
- [18] A. D. Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat de l'université du Havre, Juillet 1999.
- [19] L. Mihet-Popa, F. Belaabjerg, I. Boldea, "Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 40, No. 1, January/February 2004.
- [20] E. Bommé, "Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer", Thèse de doctorat de l'Institut polytechnique de Grenoble, Décembre 2009.
- [21] N. Bianchi, S. Bolognani et B. J. Chalmers, "Salient-rotor PM synchronous motors for an extended flux-weakening operation range", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 4, pages 1118-1125, Jul/ Aug. 2000.



- [22] M. Messaoud, R. Abdessamed, "Modeling and Optimization of Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator", *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 5, No. 6, Dec. 2011, pp. 489 – 494.
- [23] R. Lateb, "Modélisation des machines asynchrones et synchrones à Aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : Application à la propulsion marine par POD", Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, Octobre 2006.
- [24] R. Esmaili, L. Xu, "Sensorless Control of Permanent Magnet Generator in Wind Turbine Application", *IEEE*, 1-4244-0365, June 2006.
- [25] B. Singh, B. P. Singh, S. Dwivedi, "A State of Art on Different Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines", *IE(I) Journal–EL*, Vol 87 , June 2006.
- [26] A. Bouhedda, "Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne", Mémoire de magistère de l'université de Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou, option entraînements électrique, 07 juillet 2011.
- [27] F. Sahin, "Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine", Thèse de doctorat de l'Université d'Eindhoven, 2001.
- [28] A. Khlaief, "Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP) ", Thèse de doctorat de l'université d'Aix-Marseille, Juillet 2012.
- [29] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, "Modélisation des Machines Electriques", Presses de l'Université de Batna 1997.
- [30] B. N. Mobarkah, "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification en ligne des paramètres", Thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001.
- [31] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, "Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne", *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°1 (2010) 149 – 161.
- [32] M.Yin, G. Li, M. Zhou, C. Zhao, "Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration", *IEEE*, 1-4244-1298, Juillet 2007.
- [33] R. Bharanikumar, A. N. Kumar, "Analysis of Wind Turbine Driven PM Generator with Power Converters", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 4, 1793-8163, August, 2010.
- [34] S. B. Ozturk, "Modeling, Simulation and Analysis of low-cost direct torque of PMSM using hall-effect sensors", Master's thesis, Texas A&M University, December 2005.

- [35] A. G. Sanchez, M. G. Molina, A. M. Rizzato Lede "Dynamic model of wind energy conversion systems with PMSG-based variable-speed wind turbines for power system studies", *International journal of hydrogen energy*, 37 (2012) 10064-10069.
- [36] W. Biao, D. Li-jie, Z. Hua, M. Peng, Q. Xiao-yan, "Study of the Directly Driven Type of Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Containing the Dynamic Characteristics", *IEEE. Electric Power Corporation*, (No.11H0892), 2012.
- [37] Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, "PM Wind Generator Topologies", *IEEE Transaction on industry application*, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.
- [38] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Carlos Burgos, "Control of Permanent-Magnet generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid", *IEEE Transaction on energy conversion*, Vol 21, No.1, Mars 2006.
- [39] T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda, "Optimum Control of PMSG for Wind Generation System", 0-7803-7 156-9/ 2002 IEEE.
- [40] S. Achilles, M. Poller, "Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol 17, No. 2, June 2002.
- [41] M. E. Haque, M. Negnevitsky, K. M. Muttaqi, "A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, no. 1, January/February 2010.
- [42] C. Cárdenas, D. Gomez , J. Bécares, A. Morejón, L. Gorostiaga, E. Moya, "Control of a variable speed and permanent magnet wind turbine", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada (Spain)*, 23th to 25th March, 2010.
- [43] W. M. Lin, C. M. Hong, T. C. Ou, T. M. Chiu, "Hybrid intelligent control of PMSG wind generation system using pitch angle control with RBFN", *Energy Conversion and Management*, 52 (2011) 1244–1251.
- [44] R. Mittal, K. S. Sandu and D. K. Jain, "Battery Energy Storage System for Variable Speed Driven PMSG for Wind Energy Conversion System", *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol. 1, No. 3, August 2010, ISSN: 2010-0248.
- [45] L. Gidwani, H. Tiwari, R. C. Bansal, "Improving power quality of wind energy conversion system with unconventional power electronic interface", *Electrical Power and Energy Systems*, 44 (2013) 445-453.

- [46] I. E. Otadui, "Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique, application à la qualité de l'énergie électrique", Thèse de doctorat, 2003, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- [47] R. Ott, "Qualité de la tension, Creux et coupures brèves", Avec la collaboration de France de CHATEAUVIEUX (RTE), Technique de l'ingénieur, Traité Génie électrique, pp. D 426221-D 426210, 1998.
- [48] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, "Statistical analysis of voltage dips", Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [49] R. Tounsi, "Développement d'un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 30 Octobre 1999.
- [50] Y. Abdelli, "Etude et commande de convertisseurs statiques multifonction en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique", Thèse de doctorat, 2005, Université de Nantes, France.
- [51] L. Lasne, J. C. Gianduzzo, "Electrotechnique : Rappels fondamentaux puissances électriques, Systèmes triphasés, Circuit magnétique, Transformateurs, Harmoniques, Régimes transitoires, Réseaux électriques", 2007, Université de Bordeaux.
- [52] H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.
- [53] J. Arrilaga, N. R. Watson, "Power system harmonics", 2<sup>ème</sup> édition, John Wiley & Sons, 2003.
- [54] Thierry Deflandre et Philippe Maurs, "Les harmoniques sur les réseaux électriques", Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [55] E. Bettega, J. N. Fiorina, "Cahier technique 183 : Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs", Rapport technique, Schneider Electric, Janvier 2000.
- [56] M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", Thèse de doctorat, 2008, Université Henri Poincaré, Nancy France.
- [57] A. Aboubou, E. Zouzoue, S. E. Sneddon, "Contribution à la compensation de la pollution harmonique en utilisant un filtre actif parallèle commandé par logique floue", Courrier du savoir N° 3, pp. 59-63, Janvier 2003.
- [58] J. Dhombres, J. B. Robert, "Fourier - Créateur de la physique- mathématique". Editions Berlin, 1998.

- [59] M. Ferhat, "Commande en temps réel d'un filtre actif de puissance", Mémoire de magister, Université de Sétif, Algérie, 2012.
- [60] T. Ghennam, "Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP". Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, 2003.
- [61] CEI, 61000.1.1: Electromagnetic compatibility (EMC), Part 1: General, section 1: application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
- [62] IEEE STD 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE 519 working Group, 1992.
- [63] IEEE STD 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", 1995.
- [64] A. Hoseinpour, S. M. Barakati, R. Ghazi, "Harmonic reduction in wind turbine generators using a Shunt Active Filter based on the proposed modulation technique", *Electrical Power and Energy Systems*, 43 (2012) 1401-1412.
- [65] S. Chennai, "Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle", Thèse de doctorat de l'université de Mohamed Khider- Biskra, Septembre 2013.
- [66] N. S. Jayalakshmi, D. N. Gaonkar, K. Sai Kiran Kumar, "Dynamic Modeling and Performance Analysis of Grid Connected PMSG based Variable Speed Wind Turbines With Simple Power Conditioning System", *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems* December 16-19, 2012, Bengaluru, India, 2012.
- [67] A. E. Alali, "Contribution à l'étude des Convertisseurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, Strasbourg- France, 2002.
- [68] Z. Qiu, K. Zhou, Y. Li, "Modeling and Control of Diode Rectifier Fed PMSG Based Wind Turbine", *IEEE. The National Natural Science Foundation of China under Grant No. 50977013*, 2011.
- [69] G. Séguier, F. Labrique, H. Buyse, R. Bausiere, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance", Vol. 5, *Commande et comportement dynamique, Techniques et documentation*, 1998.
- [70] D. C. Lee, J. I. Jang, "Output Voltage Control of PWM Inverters for Stand-Alone Wind Power Generation Systems Using Feedback Linearization", *IAS 2005*, pp. 7803-9208.
- [71] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique, Lille-France, 2007.

- [72] J. Woo Jung, "Project sine-PWM Inverter", PhD Student, the OHIO state university.
- [73] M. Makhlof, "Modélisation et optimisation de systèmes de production d'énergies renouvelables couplés au réseau", Thèse de doctorat de l'université de Constantine, 2012.
- [74] A. Evans, V. Strezov, T. J Evans, "Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration", *Ren Sust Energy Rev* 2012; 164141– 4147.
- [75] L. T. Lam, R. Louey, "Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications", *J Power Sources* 2006; 158:1140–1148.
- [76] M. B. Camara, M. A Tankari, B. Dakyo, "Supercondensateurs : Caractérisation et Intégrations dans les applications de Transports et Énergies Renouvelables", Editions universitaires européennes (EUE); 2010.
- [77] A. K. Shukla, A. S. Arico, V. Antonucci, "An appraisal of electric automobile power sources", *Ren Sust Energy Rev* 2001; 5:137–155.
- [78] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of photovoltaic science and engineering", Chichester: John Wiley and Sons Ltd: 2003.
- [79] R. Kötz, M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors", *Electrochimica Acta*, 45, pp. 2483–2498, 2000.
- [80] Nippon Chemi-Con Corporation. Stanley Electric and Tamura announce: development of "Super CaLeCS", an environment-friendly, EDLC-powered LED Street Lamp, Sets up the lamp at the Toki Koryu Kaikan in Sado City. Niigata Prefecture, Japan. March 30, 2010.
- [81] G. Mouriès, "Condensateurs utilisés en électronique de puissance", *Technique de l'ingénieur*, D3010, 2007.
- [82] J. C. Lassègue, "Supercondensateurs", *Techniques de l'ingénieur*, D3334, 2001.
- [83] B. Multon, J. Aubry, P. Haessig, H. Ben Ahmed, "Systèmes de stockage d'énergie électrique", *Techniques de l'Ingénieur*; 2013.
- [84] R. Kötz, J. C. Sauter, P. Ruch, P. Dietrich, F. N. Büchi, P. A. Magne, P. Varenne, "Voltage balancing: Long-term experience with the 250V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT", *J Power Sources* 2007;174:264–271.
- [85] R. A. Huggins, "Supercapacitors and electrochemical pulse sources", *Solid State Ionics* 2000; 134: 179–195.
- [86] X. Tan, Q. Li, H. Wang, "Advances and trends of energy storage technology in Microgrid", *Elec Power Energy Syst* 2013; 44:179–191.

- [87] Y. Kim, N. Chang, Y. Wang, M. Pedram, "Maximum Power Transfer Tracking for a Photovoltaic-Supercapacitor Energy System", *Low-Power Electronics and Design (ISLPED)*. 2010 ACM/IEEE International Symposium, 18-20 August 2010, Austin, USA, p. 307 – 312.
- [88] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, "Optimal control of photovoltaic arrays", *Math Comput Sim* 2013; 91:1–15.
- [89] M. E. Glavin, W. G. Hurley, "Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system", *Solar Energy* 2012; 86:3009–3020.
- [90] J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, "A multi-agent system for energy management of distributed power sources", *Ren Energy* 2010; 35:174–182.
- [91] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, S. Sikkabut, S. Pierfederici, B. Davat, "Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source", *J Power Sources* 2011; 196:313–324.
- [92] S. F. Tie, C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Ren Sust Energy Rev* 2013; 20:82–102.
- [93] M. B. Burnett, L. J. Borle, "A power system combining batteries and supercapacitors in a solar/hydrogen hybrid electric vehicle", *Vehicle Power and Propulsion*, 2005 IEEE Conference 7-9 September 2005.
- [94] T. A. Centeno, F. Stoeckli, "The role of textural characteristics and oxygen-containing surface groups in the supercapacitor performances of activated carbons", *Electrochimica Acta* 52 (2006) 560–566.
- [95] J. Pikunic, K. E. Gubbins, R. J. M. Pellenq, N. Cohaut, I. Rannou, J. M. Guet, C. Clinard, J. N. Rouzaud, "Realistic molecular models for saccharose-based carbons", *Applied Surface Science*, 196 (2002) 98-104.
- [96] P. Björnbom, "Charge/discharge of an electrochemical supercapacitor electrode pore; non-uniqueness of mathematical models", *Electrochemistry Communications* 9 (2007) 211–215.
- [97] T. Kudo, Y. Ikeda, T. Watanabe, M. Hibino, M. Miyayama, H. Abe, K. Kajita, "Amorphous V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/carbon composites as electrochemical supercapacitor electrodes *Solid*", *State Ionics* 152–153 (2002) 833–841.
- [98] Maxwell technology, "Boostcap Supercapacitor Module Operating Manual", [www.Maxwell.com](http://www.Maxwell.com), 2003.

- [99] F. Belhachemi, S. Raël, B. Davat, Proceedings of the Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, vol. 5, GREENINPL-CNRS (UPRE), October 8–12, 2000.
- [100] J. C. Lassègues, J. Grondin, T. Becker, L. Servant, M. Hernandez, "Supercapacitor using a proton conducting polymer electrolyte", *Solid State Ionics* 77 (1995) 311-317.
- [101] C. Portet, P. L. Taberna, P. Simon, E. Flahaut, "Influence of carbon nanotubes addition on carbon-carbon supercapacitor performances in organic electrolyte", *Journal of Power Sources* 139 (2005) 371–378.
- [102] E. Taer, M. Deraman, I. A. Talib, S. A. Hashmi, A. A. Umar, "Growth of platinum nanoparticles on stainless steel 316L current collectors to improve carbon-based supercapacitor performance", *Electrochimica Acta* 56 (2011) 10217– 10222.
- [103] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, A. Berthon, "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling", *Journal of Power Sources* 165 (2007) 928–934.
- [104] L. Zubieta, R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications", *IEEE-IAS'98*, (1998) 1149-1154.
- [105] F. Belhachemi, "Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance", PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001.
- [106] N. Rizoug, "Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance", PhD thesis, Université de Lille, 2006.
- [107] P. O. Logerais, O. Riou, M. A. Camara, J. F. Durastanti, "Study of Photovoltaic Energy Storage by Supercapacitors through Both Experimental and Modelling Approaches", *J Solar Energy* 2013.
- [108] M. A. Camara, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs", PhD thesis, Université Paris-Est, 2011.
- [109] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, F. E. Ruppert. "Modelling and circuit-based simulation of photovoltaic array". *Brazilian J Power Electronics* 2009; 14(1):35–45.
- [110] H. Gualous, D. Bouquain, A. Berthon, J. M. Kauffmann, "Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature", *J Power Sources* 2003; 123:86–93.
- [111] R. A. Huggins, "Transient behavior of insertion reaction electrodes", *Solid State Ionics* 1996; 86–88: 41–48.

- [112] G. Sartorelli, A. Schneuwly, J. Auer, "Technologies et applications des supercondensateurs. Colloque Énergie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications", UTBM, Belfort, June 18, 2004.
- [113] C. Decaux, G. Lota, E. Raymundo-Pinero, E. Frackowiak, F. Béguin, "Electrochemical performance of a hybrid lithium-ion capacitor with a graphite anode preloaded from lithium bis (trifluoromethane) sulfonimide-based electrolyte", *Electrochimica Acta* 2012;86:282–286.
- [114] M. Al Sakkaa, H. Gualous, J. Van Mierlo, H. Culcu, "Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications", *Journal of Power Sources* 2009;194:581–587.
- [115] Y. Dandeville, P. Guillemet, Y. Scudeller, O. Crosnier, L. Athouel, T. Brousse, "Measuring time-dependent heat profiles of aqueous electrochemical capacitors under cycling", *Thermochimica Acta* 2011;526:1–8.
- [116] M. A. Camara, **A. Djellad**, P. O. Logerais, O. Riou, J. F. Durastanti, "Modeling of a hybrid energy storage system supplied by a photovoltaic source to feed a DC motor", *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013; 2(6); 222-228.
- [117] **A. Djellad**, P. O. Logerais, A. Omeiri, O. Riou, J. F. Durastanti, "Optimization of the energy transfer in a system combining photovoltaic source to ultracapacitors", *International Journal of Hydrogen Energy* 39(2014), 15169-15177.





*Annexes*

## Annexes

### Spécifications fabricant panneau photovoltaïque Kyocera KC200GT



# KC200GT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL  
PHOTOVOLTAIC MODULE



## HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover

and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.

Equipped with plug-in connectors.



## APPLICATIONS

**KC200GT is ideal for grid tie system applications.**

- Residential roof top systems
- Large commercial grid tie systems
- Water Pumping systems
- High Voltage stand alone systems
- etc.

## QUALIFICATIONS

- **MODULE** : UL1703 certified
- **FACTORY** : ISO9001 and ISO 14001

## QUALITY ASSURANCE

**Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.**

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal / Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

## LIMITED WARRANTY

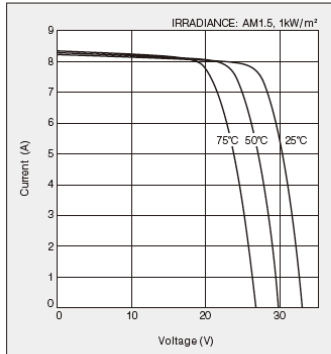
※1 year limited warranty on material and workmanship

※20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

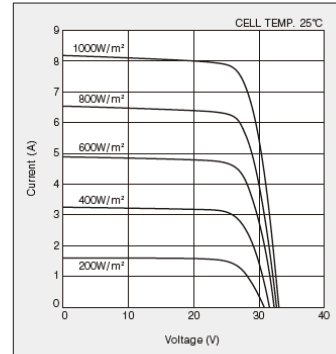
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various irradiance levels

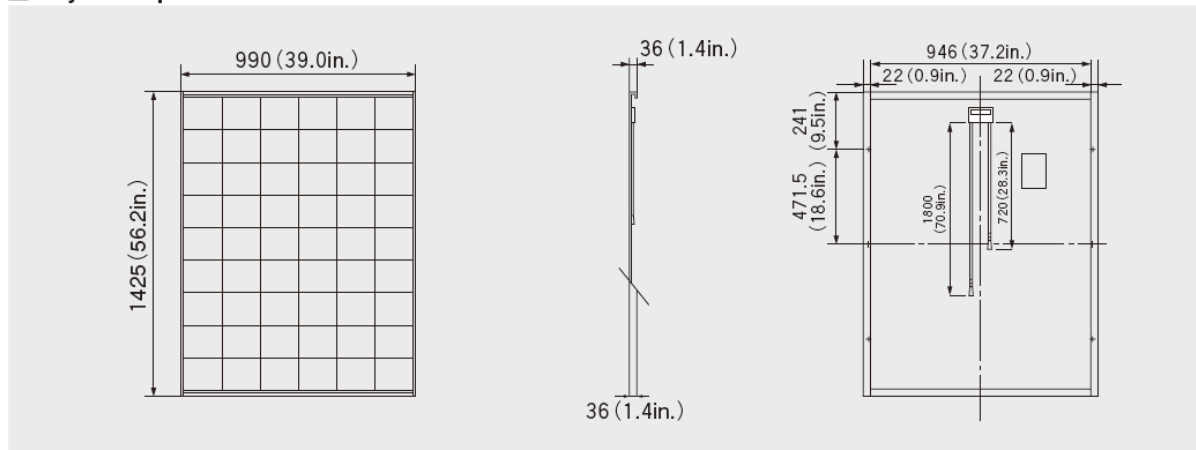


## SPECIFICATIONS

## KC200GT

### Physical Specifications

Unit : mm (In.)



### Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Impp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	−1.23×10 <sup>-1</sup> V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18×10 <sup>-3</sup> A/°C
*STC : Irradiance 1000W/m <sup>2</sup> , AM1.5 spectrum, module temperature 25°C	
Electrical Performance at 800W/m <sup>2</sup> , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	142W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	23.2V
Maximum Power Current (Impp)	6.13A
Open Circuit Voltage (Voc)	29.9V
Short Circuit Current (Isc)	6.62A

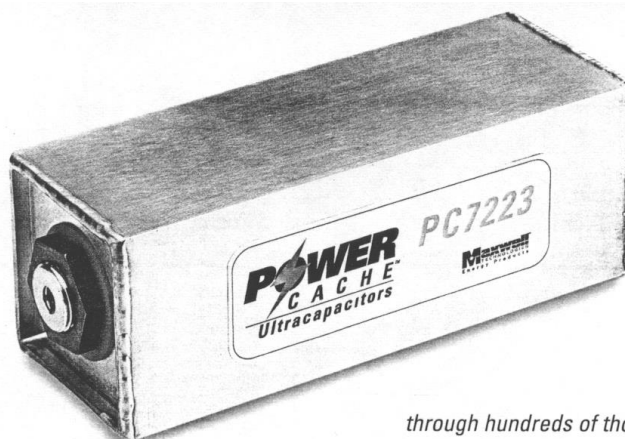
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

Cells	
Number per Module	54
Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425mm(56.2in.)×990mm(39.0in.)×36mm(1.4in.)
Weight	18.5kg(40.7lbs.)
Cable	(+):720mm(28.3in.),(-):1800mm(70.9in.)
Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.6mm(4.5in.)×76mm(3.0in.)×9mm(0.4in.)
IP Code	IP65
Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> (module temperature 25°C)

## Spécifications constructeur supercondensateur Maxwell PC7223

The PowerCache™ PC7223 caches 7200 Joules of energy for immediately available high power delivery at a nominal 2.3 volts. With 2700 Farads of capacitance, the PC7223 is the world's highest capacitance ultracapacitor cell in mass production.



Product Specifications			
Parameter	Specification	Units	
Model	PC7223		
Case	Aluminum		
Electrode	Carbon		
Electrolyte	Organic		
Dimensions	164 x 62 x 62	mm	
Weight	800	g	
Volume	0.623	l	
Rated Capacitance	2700	F	
Stored Energy (Float V)	7142	J	
Specific Energy (Float V)	2.48	Wh/kg	
Maximum Float Voltage	2.3	V	
Maximum Surge Voltage	2.7	V	
Rated Current	400	A	
Operating Temperature	-20 to 60	°C	
Storage Temperature	-30 to 85	°C	
Leakage Current	0.007	A	
Series Resistance (25°C)			
DC	0.85	mΩ	
1kHz	0.5*	mΩ	
Performance Characteristics			
Parameter	Value	Unit	Comments
Specific Power			
Peak @ 2.7V	4556	W/Kg	Assumes constant current discharge from 2.3V to 1.15V
Peak @ 2.3V	3306	W/Kg	
6 seconds to ½ V	732	W/Kg	
30 seconds to ½ V	106	W/Kg	
300 seconds to ½ V	22	W/Kg	
Discharge Energy			
@ 300 seconds	5302	J	
@ 60 seconds	5095	J	
@ 6 seconds	3517	J	
Energy Efficiency			
@ 300 seconds	99	%	Efficiency = energy delivered / (energy delivered + lost) for constant discharge.
@ 60 seconds	98	%	
@ 6 seconds	83	%	

\*Estimated

through hundreds of thousands of charges and discharges without performance degradation.

**PowerCache** ultracapacitors provide an excellent source of burst power.

With discharges ranging from fractions of a second to several minutes, a **PowerCache** ultracapacitor will improve the ability of many battery-based systems to meet application requirements. Since it has a higher power density than a battery, **PowerCache** supplies the application's need for bursts of power, while extending the useful life of its battery.

The unique construction of the **PowerCache** ultracapacitor provides a true electrostatic storage capability. It can cycle

Capable of accepting a charge at the same rate it discharges, **PowerCache** is an ideal addition to systems that can benefit from the capture of regenerative energy.

The **PowerCache PC7223** is configured as a convenient building block with axial terminals. With this scalable design, the PC7223 can be packaged to fit the specific requirements of a wide variety of high voltage applications.

**Maxwell**  
TECHNOLOGIES  
Energy Products