

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/ 2023

المرجع : ...../م/م / 2023

**Mémoire de Master**

**Présenté au**

**Département : Génie Électrique  
Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Electrotechnique Industrielle**

Réalisé par :

**DEMDOUM Aghilas**

**Et**

**BOUFERKAS Amira**

Thème

**Etude et gestion d'énergie d'un système hybride à énergie  
renouvelable**

**(Éolienne, pile à combustible et la batterie)**

Soutenu le: 02/07/2023

Devant le Jury composé de :

Mdme: OUADFEL Ghania	M.A.B	Univ . USTHB	Président
Mdme: BENSMAIL Samia	M.C.B	Univ. Bouira	Encadreur
Mr:FEKIK Arezki	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur

Année Universitaire : 2022-2023



## التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية



أنا الممضي اسفله،

السيد(ة) جوفركاست أميرة .....الصفة: طالب ( ماستر / دكتوراه )

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 402632138 .....والصادرة بتاريخ 2021/08/14

المسجل(ة) بكلية / معهد علوم وتكنولوجيا قسم الهندسة الكهربائية

تخصص: الكهرباء وتقني هياكل

والمكلف(ة) بإنجاز أعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude et gestion d'énergie d'un système hybride à énergies renouvelable (éolienne, pile à combustible, batterie)

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

توقيع المعني (ة)

التاريخ: 2023/07/12

البويرة في: .....	هيئة مراقبة السرقة العلمية:
الامضاء	النسبة:
	<input type="text" value="19%"/>



## التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية



انا الممضي اسفله،

السيد(ة) ..... السيد(ة) ..... الصفقة: طالب ( ماستر / دكتوراه )

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: ..... 4013 89135 ..... والصادرة بتاريخ: ..... 2022/04/19

المسجل(ة) بكلية / معهد علوم وتكنولوجيا ..... قسم ..... (هندسة الكهرمائية)

تخصص: ..... الأتاروتقني صناعي

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude et gation d'energie d'un système hybride d'

..... energie renouvelable (éolienne pile à combustible batterie)

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

توقيع المعني (ة)

التاريخ: 2023/07/12

هيئة مراقبة السرقة العلمية:

البويرة في: .....

الامضاء

%

19

النسبة:

## **Dédicace**

*Je souhaite dédier humblement ce travail à mes très chers parents, mon cher père Arezki et ma chère mère Fatima. Je témoigne tout mon respect et mon affection en reconnaissance de leur soutien, de leurs sacrifices et de leur patience.*

*Je suis également reconnaissant envers mon chers frère Massi et ma chère sœur Kahina pour les efforts et l'attachement qu'ils m'ont apportés pour me soutenir. Je pense également à mon cher neveu Mayas, dont la présence a été une source de joie dans ma vie.*

*Mes grandes mères méritent également ma gratitude pour leur patience qui a contribué à forger la personne que je suis aujourd'hui. Que Dieu les protège, incha'Allah.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toute ma famille, ainsi qu'envers mes collègues et mes amis. Votre soutien et votre amitié ont été précieux pour moi.*

*Un sincère merci à toute la promotion d'électrotechnique 2023. Votre camaraderie et votre collaboration ont été essentielles dans la réalisation de ce travail.*

*Enfin, mes remerciements s'adressent à tous ceux que j'aime et qui ont été présents dans ma vie. Votre amour et votre soutien sont inestimables.*

*AghilasDemdoum*

## **Dédicace**

*Je souhaite dédier ce travail à ma très chère mère et à mon cher père, qui ont toujours été à mes côtés dans les moments difficiles. Ils m'ont tout appris et ont tant donné sans rien demander en retour. Que Dieu les garde, chers parents.*

*Je tiens également à dédier ce travail à mes très chers frères (Charafeddine, Billel, Aymen) et ma sœur (Rawan), qui ont toujours été présents dans les bons moments ainsi que dans les moments difficiles. Que Dieu vous garde pour moi.*

*Je souhaite également dédier ce travail à toute ma famille, qui a été un soutien précieux dans ma vie.*

*Mes remerciements s'adressent également à mes collègues et à mes amies, qui ont partagé cette expérience avec moi.*

*AmiraBouferkas*



## Remerciements

*Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu tout puissant qui nous a aidés à la réalisation de ce travail.*

*À la suite, nous tenons à remercier vivement **Mme « Bensmail Samia »** notre encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury **Mme « OuadfelGhania »** et **Mr « Fekik Arezki »** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Et tous les professeurs du département de Génie électrique.  
À tout ce qui fut à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail.*

*Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*



## Résumé

L'utilisation croissante des énergies renouvelables pour la production d'énergie est une option prometteuse pour répondre à la demande mondiale croissante en énergie. Cependant, en raison de leur nature stochastique, ces sources d'énergie ne garantissent pas une alimentation continue. Pour remédier à ce problème, l'association de plusieurs types de sources renouvelables, tels que l'éolien, les piles à combustible et les batteries, semble être la solution idéale.

Ce travail examine deux aspects importants. Premièrement, il se penche sur la sélection de la méthode de gestion la plus appropriée pour un système hybride donné. Deuxièmement, il vise à maximiser l'utilisation d'une ressource renouvelable spécifique. Pour atteindre ces objectifs, une modélisation détaillée et une simulation de divers éléments du système hybride sont présentées et discutées.

Afin de maximiser l'utilisation de la ressource renouvelable, un algorithme classique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est introduit, visant à obtenir un rendement énergétique optimal. La gestion de l'énergie des différentes sources, notamment l'éolien, est assurée par un superviseur.

Ces approches et modélisations offrent des perspectives intéressantes pour développer des systèmes hybrides efficaces utilisant les énergies renouvelables, tout en assurant une alimentation énergétique plus stable et durable.

Mots clés : système hybride ,éolien, batterie, gestion d'énergie, pile à combustible.

### ملخص

يعد الاستخدام المتزايد للطاقة المتجددة لتوليد الطاقة خيارًا واعيًا للتلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة. ومع ذلك، نظرًا للطبيعية العشوائية لأن مصادر الطاقة هذه التي تضمن استمرار الإمداد. لمعالجة هذه المشكلة، يبدو أن الجمع بين عدة أنواع من المصادر المتجددة، مثل طاقة الرياح وخلايا الوقود والبطاريات، هو الحل الأمثل.

في هذا العمل، يتم تناول جانبين. أولاً، اختيار الإدارة الأنسب للنظام الهجين. بيد ذلك، يتم النظر في تنظيم استخدام مورد محدد. تحقيقاً لهذه الغاية، يتم تقديم نموذج ومحاكاة لتبصر مخاتلة النظام الهجين.

من أجل تنظيم الاستفادة من الموارد المتجددة، تم تقديم خوارزمية تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة (MPPT)، بهدف تحقيق الاستفادة المثلى للطاقة. يتم ضمان إدارة الطاقة من المصادر المتخلفة، والسيطرة على طاقة الرياح، من قبل المشرف.

تقدم هذه الأساليب والنمذجة وجهات نظر مبررة للإهتمام لتطوير أنظمة هجينة فعالة باستخدام الطاقات المتجددة، مع ضمان إمدادات طاقة أكثر استمرارية واستدامة.

الكلمات المفتاحية: النظام الهجين، طاقة الرياح، البطارية، إدارة الطاقة، خلية الوقود.

### Abstract

The increasing use of renewable energies for power generation is a promising option for meeting the world's growing demand for energy. However, due to their stochastic nature, these



energy sources do not guarantee a continuous supply. To remedy this problem, the combination of several types of renewable sources, such as wind power, fuel cells and batteries, seems to be the ideal solution.

In this work, two aspects are addressed. First, the choice of the most suitable management for the hybrid system. Next, maximizing the use of a renewable resource is considered. To this end, a modeling and simulation of different elements of the hybrid system are presented.

In order to maximize the use of the renewable resource, a classical Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm is introduced, aimed at achieving optimal energy efficiency. Energy management of the various sources, including wind power, is handled by a supervisor.

These approaches and models offer interesting prospects for developing efficient hybrid systems using renewable energies, while ensuring a more stable and sustainable energy supply.

Keywords: hybrid system, wind power, battery, energy management, fuel cell.



## Table des matières

<b>Dédicace .....</b>	<b>IV</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>V</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>VI</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>XII</b>
<b>Liste des Tableaux.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Listes des Acronymes et Symboles .....</b>	<b>XV</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapitre I : généralités sur les systèmes hybrides .....</b>	<b>22</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>Définition des systèmes hybrides .....</b>	<b>3</b>
<b>Les Différentes configurations des systèmes de génération hybrides .....</b>	<b>3</b>
<b>Architecture à bus continu .....</b>	<b>4</b>
<b>Architecture à bus alternatif .....</b>	<b>4</b>
<b>I. 3.3 Les Avantages et les inconvénients d'un système hybride .....</b>	<b>5</b>
<b>L'énergie éolienne .....</b>	<b>5</b>
<b>Les composants d'une éolienne .....</b>	<b>6</b>
<b>Principe de Fonctionnement.....</b>	<b>6</b>
<b>Les types d'éoliennes .....</b>	<b>7</b>
<b>Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....</b>	<b>8</b>
<b>La pile à combustible .....</b>	<b>8</b>
<b>Définition.....</b>	<b>8</b>
<b>Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEM.....</b>	<b>9</b>
<b>Les types de piles à combustible.....</b>	<b>10</b>

<b>Domaines d'applications des piles PEM</b> .....	10
<b>Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible</b> .....	11
<b>La batterie</b> .....	11
<b>Définition</b> .....	11
<b>Principe de fonctionnement</b> .....	12
<b>Les différents types de batteries</b> .....	12
<b>Conclusion</b> .....	12
<b>Chapitre II : modélisation du système hybride</b> .....	14
<b>Introduction</b> .....	14
<b>Structure d'un système électrique hybride</b> .....	14
<b>Modélisation de la chaîne de production éolienne</b> .....	15
<b>Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz)</b> .....	15
<b>Fonctionnement optimal d'une éolienne</b> .....	19
<b>Modélisation de la turbine éolienne</b> .....	19
<b>Caractéristique <math>C_p(\lambda)</math> de la voilure</b> .....	20
<b>Le multiplicateur de vitesse</b> .....	21
<b>Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP</b> .....	21
<b>Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé</b> .....	21
<b>Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé</b> .....	22
<b>Equations électriques</b> .....	22
<b>Equations des flux magnétiques</b> .....	22
<b>L'équation mécanique</b> .....	22
<b>Modélisation de redresseur</b> .....	23
<b>Modélisation du bus continu</b> .....	23
<b>Modélisation de pile à combustible</b> .....	24
<b>Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC</b> .....	25
<b>La tension de Nernst</b> .....	26
<b>Les Pertes d'activation</b> .....	27

Les pertes ohmiques.....	27
Les pertes de concentration .....	28
Caractéristique de la pile combustible PEMFC .....	28
Caractéristique tension-densité de courant de la pile PEMFC .....	28
La courbe de puissance.....	29
Influence de la température .....	30
Taux d'hydrogène consommé .....	31
Modélisation de l'électrolyseur .....	32
Débit de production d'Hydrogène.....	33
Modèle thermique .....	34
Stockage d'hydrogène .....	35
Modélisation de la batterie .....	36
Modélisation d'hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) .....	36
Conclusion.....	37
Chapitre III : Commande et gestions d'énergie du système hybride.....	38
Introduction .....	38
Le système de conversion éolienne.....	38
Maximisation de puissance avec la connaissance de la courbe caractéristique.....	38
Commande de la chaine de conversion éolienne .....	40
Commande vectorielle.....	40
Gestion d'énergie.....	42
Principe de fonctionnement de l'algorithme de gestion.....	42
Simulation et interprétation .....	45
Analyse des résultats .....	50
Conclusion.....	51
Conclusion générale .....	52
Reference Bibliographique.....	54



## Liste des figures

<b>Figure I. 1. Configuration du système hybride à bus continu.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure I. 2. Configuration du système hybride à bus alternatif.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure I. 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent .....</b>	<b>6</b>
<b>Figure I. 4. Différentes parties d'une éolienne .....</b>	<b>6</b>
<b>Figure I. 5. Eolienne à axe vertical .....</b>	<b>7</b>
<b>Figure I. 6. Eolienne à axe horizontal.....</b>	<b>8</b>
<b>Figure I. 7. Une pile à combustible .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure I. 8. Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas).....</b>	<b>10</b>
<b>Figure I. 9. Décharge/charge d'une Batterie électrochimique .....</b>	<b>12</b>
<b>Figure II. 1. Structure générale d'un exemple de système électrique hybride .....</b>	<b>14</b>
<b>Figure II. 2. la chaîne de production d'une éolienne .....</b>	<b>15</b>
<b>Figure II. 3. Tube de courant autour d'une éolienne .....</b>	<b>16</b>
<b>Figure II. 4. Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable .....</b>	<b>19</b>
<b>Figure II. 5. Caractéristique CP (<math>\lambda</math>).....</b>	<b>20</b>
<b>Figure II. 6. Représentation symbolique de la GSAP .....</b>	<b>19</b>
<b>Figure II. 7. Schéma représentatif des enroulements de la (GSAP) dans le plan (d, q).....</b>	<b>22</b>
<b>Figure II. 8. Schéma du redresseur MLI .....</b>	<b>23</b>
<b>Figure II. 9. le bus continu <math>V_{dc}</math>.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure II. 10. Représente la courbe de polarisation d'une pile à combustible.....</b>	<b>25</b>
<b>Figure II. 11. Caractéristique <math>V_{pac} = f(I_{pac})</math> de la pile PEMFC .....</b>	<b>26</b>
<b>Figure II. 12. Caractéristique <math>P_{pac} = f(I_{pac})</math> de la pile PEMFC .....</b>	<b>27</b>
<b>Figure II. 13. Modèle R-C de la batterie. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figure II. 14. Schéma d'un hacheur Buck-Boost .....</b>	<b>28</b>
<b>Figure II. 15. Modèle R-C de la batterie... ..</b>	<b>34</b>
<b>Figure II. 16. Schéma d'un hacheur Buck-Boost .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure III. 1. Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III. 2. Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT . ....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III. 3. la représentation schématique du concept de commande vectorielle. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III. 4. Principe de la commande vectorielle. ....</b>	<b>40</b>

<b>Figure III. 5. Schéma de principe de la stratégie de gestion.</b>	<b>40</b>
<b>Figure III. 6. Organigramme de la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien.</b>	<b>44</b>
<b>Figure III. 7. Vitesse du vent en fonction de temps.</b>	<b>45</b>
<b>Figure III. 8. La puissance demandée par la charge.</b>	<b>45</b>
<b>Figure III. 9. la puissance produite par l'éolienne.</b>	<b>46</b>
<b>Figure III. 10. la différence entre la puissance de l'éolienne et la puissance de charge <math>\Delta P</math>.</b>	<b>46</b>
<b>Figure III. 11. La vitesse de turbine.</b>	<b>46</b>
<b>Figure III. 12. Le couple électromagnétique.</b>	<b>47</b>
<b>Figure III. 13. le graphe de courant <math>I_q</math>.</b>	<b>47</b>
<b>Figure III. 14. le graphe de courant <math>I_d</math>.</b>	<b>47</b>
<b>Figure III. 15. graphe de la tension de bus.</b>	<b>48</b>
<b>Figure III. 16. l'état de charge de la batterie.</b>	<b>48</b>
<b>Figure III. 17. graphe de Puissance de la batterie.</b>	<b>48</b>
<b>Figure III. 18. Puissance de la pile à combustible.</b>	<b>49</b>
<b>Figure III. 19. quantité d'hydrogène requise.</b>	<b>49</b>
<b>Figure III. 20. les puissances de système hybride.</b>	<b>48</b>
<b>Figure III. 21. Mode de fonctionnement.</b>	<b>48</b>

**Liste des Tableaux**

Chapitre I

Tableau I. 1. Différents types de pile à combustible..... 10

## Listes des Acronymes et Symboles

### • Acronymes

PEM : Proton Exchange Membrane

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent.

MLI : Modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation).

MPPT : Recherche point de puissance maximale (Maximum PowerPoint Tracking).

H<sub>2</sub> : Hydrogène.

H<sub>2</sub>O : Eau.

EDC : Egalement l'état de charge de la batterie.

SOC : State of charge.

### • Symboles

<b>D<sub>m</sub></b>	Débit massique d'air,
<b>F</b>	Force exercée par l'air sur le capteur éolien.
<b>P<sub>F</sub></b>	Puissance développée par la force exercée.
<b>x</b>	Ratio de vitesse.
<b>P</b>	Pression.
<b>V</b>	Vitesse de l'air.
<b>P<sub>0</sub></b>	La puissance incidente du vent non perturbé.
<b>P</b>	masse volumique de l'air (1,20 Kg/ <b>m</b> <sup>3</sup> pour l'air à 20°C).
<b>S</b>	Surface balayée par les pales de la turbine éolienne en ( <b>m</b> <sup>2</sup> ).
<b>V<sub>amont</sub></b>	vitesse incidente (amont) du vent en m/s.
<b>Ω<sub>t1</sub></b>	La vitesse de rotation avant multiplicateur (axe lent).
<b>R<sub>p</sub></b>	Le rayon de pale de l'éolienne.
<b>C<sub>p</sub></b>	Coefficient de puissance.
<b>S</b>	La surface de la turbine (S=π <b>R</b> <sup>2</sup> ).
<b>P</b>	Représente la densité de l'air (dans les conditions normales, ρ=1.225 Kg / <b>m</b> <sup>3</sup> ).
<b>V<sub>v</sub></b>	La vitesse moyenne du vent.
<b>A<sub>t</sub></b>	La surface balayée par la turbine éolienne.

$\rho$	La masse volumique de l'air.
$V_v$	La vitesse du vent.
$T_t$	Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
$T_{em}$	Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.
G	le gain du multiplicateur.
$\Omega_t$	La vitesse de rotation de la turbine.
$\Omega$	la vitesse de rotation à l'entrée de la génératrice.
$\varphi_{a,b,c}$	sont les flux totaux induits dans les phases a, b et c du stator.
$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$	Tensions de références.
$V_{dc}$	Tension redressée.
$I_{dc}$	Courant modulé par le redresseur.
$S_a, S_b, S_c$	Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.
$I_c$	Le courant qui traverse le condensateur.
N	Le nombre des cellules de la pile.
$E_{Nernst}$	La tension de Nernst (volt).
$V_{act}$	Pertes d'activation (volt).
$V_{ohm}$	Pertes ohmiques (volt).
$V_{conc}$	Pertes de concentration (volt).
$\Delta G$	Le changement d'énergie libre (J/K.mol).
$\Delta S$	Le changement d'entropie (J/K.mol).
F	La constante de Faraday (96.487 C/K.mol).
T	La température absolue opérationnelle.
$T_0$	La température de référence (K).
R	La constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K.mol) .
$P_{anode}$	La pression de l'hydrogène à l'anode.
$P_{cathode}$	La pression de l'oxygène à la cathode.
$P_{H_2O}^{Sat}$	La pression de saturation d'eau.

$\eta_0, a, b$	constantes empirique.
$R_{ohm_0}$	La partie constante de $R_{ohm}$ .
$K_{RI}$ Et $K_{RT}$	sont des constantes empiriques.
$I_{lim}$	Courant de limitation ou le courant maximal.
$Z$	est le nombre d'électrons participants à la réaction.
$V_{an}$	est le volume de l'anode (en litre) .
$n_{H_2}$	est le nombre de mole d'hydrogène dans le canal anode.
$R$	la constante universelle des gaz parfait (8,31447 J/mol/K).
$T$	représente la température en Kelvin (K).
$q_{H_2}$	représente le débit molaire de l'hydrogène (kmol/s).
$K_r$	est une constante de paramètre de modélisation [kmol/(s.A)].
$N_s$	Le nombre des cellules de la pile.
$I_{pac}$	Intensité du courant d'une cellule de la pile à combustible (A).
$r_{H_2}$	est la valeur du temps de réponse du système associée au débit d'hydrogène en seconde.
$V_{élec\_cell}$	La tension aux bornes de la cellule (V).
$V_{rév}$	La tension réversible de cellule(V).
$r_1, r_2$	les paramètres de résistance ohmique ( $\Omega \cdot m^2$ , $\Omega \cdot m^2/^\circ C$ ) .
$K_{éle}$ , $K_{T_1}$ , $K_{T_2}$ , $K_{T_3}$	les paramètres de surtension (V), ( $m^2/A$ ), ( $m^2$ ) . ( $\square/A$ ), ( $m^2$ )( $^\circ C^2/A$ ).
$\Delta G$	est l'énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol) ;
$F$	La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) ;
$V_{rév}^0$	est la tension de cellule réversible à l'état standard (V) ;
$K_{rév}$	est coefficient empirique de température de $V_{rév}$ (V/ $^\circ C$ ) ;
$n_{H_2}$	Débit de production d'Hydrogène (mole/sec).
$\eta_F$	Rendement faradique
$f_1, f_2$	( $mA^2 cm^{-4}$ ), Les paramètres utilisés pour le calcul du rendement faradique.

$C_t$	est la capacité thermique globale de l'électrolyseur ;
$Q_{gen}$	est la puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur.
$Q_{pert}$	La perte de puissance calorifique.
$R_t(^{\circ}C/W)$ ;	:est résistance thermique de l'électrolyseur
$T_a$	: est la température ambiante ( $^{\circ}C$ ) .
$Q_{refroidissement}$	La perte de puissance calorifique dû au refroidissement
$C_{cm}$	est la capacité thermique de l'eau de refroidissement ( $J/^{\circ}C$ ).
$T_{cm_e}$	est la température de l'eau de refroidissement d'entrée ( $^{\circ}C$ ).
$T_{cm_s}$	est la température de l'eau de refroidissement de sortie ( $^{\circ}C$ ).
$V_{AHX}$	Coefficient d'échange calorifique effectif pour le processus de refroidissement.
$h_{cond}$	Coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction ( $W/^{\circ}C$ ).
$h_{conv}$	Coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection ( $W/^{\circ}C.A$ ).
$P$	Pression (pascale).
$n$	Nombre de moles (mol).
$R$	Constante de gaz universelle.
$T$	Température (K).
$V$	Volume de stockage ( $m^3$ ).
$T_{cr}$	Température critique (K).
$P_{cr}$	Pression critique (Pa).
$Q_d$	La quantité de charge manquante par rapport à $C_{bat}$ .
$C_{bat}$	La capacité (Ah) nominale de la batterie.

# Introduction Générale

## Introduction générale

Les énergies fossiles, notamment le pétrole, le charbon et le gaz naturel, ont joué un rôle crucial dans le progrès industriel et économique mondial au fil des siècles passés. Elles ont été une source d'énergie abondante et économique, permettant ainsi à nos sociétés de prospérer.

Malgré les avantages énergétiques qu'elles offrent, l'utilisation des énergies fossiles présente des risques considérables pour l'environnement et la santé humaine ainsi qu'ils sont liée à la pollution de l'air, de l'eau et des sols.

Face à cette réalité, les chercheurs et les acteurs de l'industrie se tournent de plus en plus vers des sources d'énergie renouvelables et des méthodes de production respectueuses de l'environnement. Ils exploitent les énergies propres disponibles sur terre, telles que l'énergie éolienne, hydraulique, solaire et géothermique, dans le but de réduire au maximum la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles. Cette transition vers des sources d'énergie durables a des répercussions positives dans de nombreux domaines, notamment sur le plan énergétique, climatique et même agricole [1].

Il existe différentes catégories d'énergies renouvelables qui sont considérées comme des alternatives durables et respectueuses de l'environnement par rapport aux énergies fossiles. Parmi celles-ci, on distingue principalement trois sources d'énergie les plus utilisées : l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie géothermique, qui est sous forme de chaleur. Jusqu'à présent, les capacités installées des énergies renouvelables ne sont pas en mesure de rivaliser avec les grandes centrales actuelles en raison de leur intermittence et de leur caractère fluctuant.

Pour garantir un approvisionnement continu en énergie il faut une coordination entre les différentes sources de production d'électricité, et des moyens de stockage, tels que les batteries. Et parmi ces sources « Les piles à combustible » qui représentent une option très attrayante à utiliser en combinaison avec une source d'énergie intermittente telle que l'énergie éolienne. Les systèmes d'alimentation à pile à combustible se caractérisent par de nombreuses fonctionnalités attrayantes, telles que l'efficacité, la réponse rapide à la charge, la modularité de la production et le carburant utilisé. Des études ont démontré avec succès la faisabilité de leur utilisation en coordination avec des systèmes éoliens pour des applications électriques connectées au réseau ainsi que pour des systèmes autonomes.

Ces sources d'énergies renouvelables et les moyens de stockage associés constituent un système hybride permettant de répondre aux besoins énergétiques de manière plus durable et efficace [1] [2].

Un système hybride est caractérisé par la combinaison de différentes sources d'énergie, permettant ainsi d'optimiser l'efficacité énergétique, d'assurer une production d'énergie plus stable et de répondre de manière fiable aux besoins énergétiques. Ces systèmes hybrides jouent un rôle essentiel dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de développer une stratégie de gestion d'énergie pour un système hybride. Ce système est composé d'une éolienne pour la production d'électricité, associée à une pile à combustible et une batterie pour le stockage de l'énergie électrique. Notre projet sera organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre de ce projet consiste à décrire les différents concepts fondamentaux associés à un système hybride qui est composé d'une éolienne, pile à combustible et les batteries. Nous aborderons les différents types, les composants ainsi que le principe de fonctionnement de chacun, leurs domaine d'application, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre sera consacré a la modélisation du système hybride (éolienne, pile à combustible et la batterie) et leur sous-systèmes. De plus la structure d'un système électrique hybride et leurs caractéristiques ainsi que l'influence des conditions climatique sur la production d'énergie.

Le troisième chapitre sera consacré à la gestion et la simulation du système hybride à l'aide de l'environnement de modélisation Matlab-Simulink.

Nous commencerons par essayer par optimiser la puissance à la sortie du générateur éolien en utilisant un algorithme MPPT classique. De plus, nous contrôlerons une machine synchrone à aimant permanent par la commande vectoriel pour maintenir la tension du bus continu fixe, quelle que soit la variation de la vitesse du vent.

Le stockage selon la disponibilité de l'énergie produite et la demande de la charge

Enfin, pour gérer les flux d'énergie de notre système, nous utiliserons un superviseur qui mettra en œuvre une stratégie bien étudiée pour alimenter la charge de manière ininterrompue. Nous terminons ce travail par des perspectives.

# **Chapitre I : généralités sur les systèmes hybrides**

**Introduction**

Les énergies renouvelables ont apporté une nouvelle dimension à notre société, engendrant des défis technologiques, économiques et sociologiques. La production d'énergie électrique à partir de ces sources suscite de nombreuses initiatives, avec une forte demande sur le marché du travail.

Ces sources d'énergie renouvelables jouent également un rôle crucial pour répondre à la demande mondiale croissante d'énergie, résultant des activités industrielles dans les pays développés. Les investissements des entreprises dans des régions offrant des coûts de production plus bas ont rapidement amplifié cette demande mondiale d'énergie [3].

Dans ce premier chapitre, nous analysons le fonctionnement des différentes sources d'alimentation électrique dans un système hybride. Nous étudierons également leurs caractéristiques électriques, leurs limitations, ainsi que leurs avantages et inconvénients. De plus, nous nous pencherons sur les composants qui composent ces sources.

Dans le cadre de ce travail, les éléments fondamentaux de notre système hybride sont l'éolienne, la pile à combustible et les batteries.

**Définition des systèmes hybrides**

Un système hybride est un système qui intègre différentes méthodes de production d'énergie. À l'heure actuelle, les systèmes hybrides d'énergie combinent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles, généralement des générateurs, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Les sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie éolienne, ne fournissent pas une puissance constante. En les associant à d'autres sources, on peut obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux réseaux électriques interconnectés et sont souvent utilisés dans des régions isolées [4].

**Les différentes configurations des systèmes de génération hybrides**

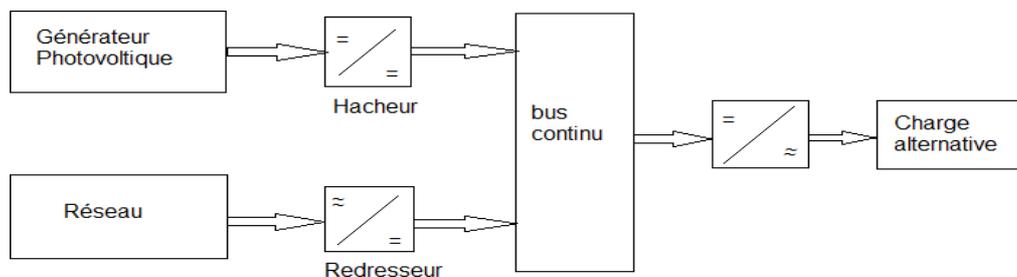
Le système hybride intègre généralement une combinaison de sources d'énergie conventionnelles (comme le diesel et le réseau électrique) et renouvelables (telles que l'éolien, le solaire, la biomasse, etc.), ce qui permet d'améliorer l'autonomie du système.

De plus, le système est équipé d'un gestionnaire d'énergie qui assure une gestion optimale du flux d'énergie. Ces composants peuvent être interconnectés selon différentes architectures, comme illustré dans les figures (I.1) et (I.2). Dans la plupart des architectures, la collecte des flux d'énergie

sur un bus continu est la plus couramment utilisée, car elle offre une mise en œuvre simple et ne nécessite pas de processus de synchronisation, contrairement à la technique du bus alternatif.

### Architecture à bus continu

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.1), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries sont dimensionnées pour alimenter des pics de charge. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande [5]



**Figure I. 1.** Configuration du système hybride à bus continu [5].

### Architecture à bus alternatif

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.2). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. Dans le cas d'une faible demande de charge, tous les générateurs et les systèmes de stockages sont à l'arrêt sauf par exemple le générateur photovoltaïque, pour couvrir la demande de la charge [6].

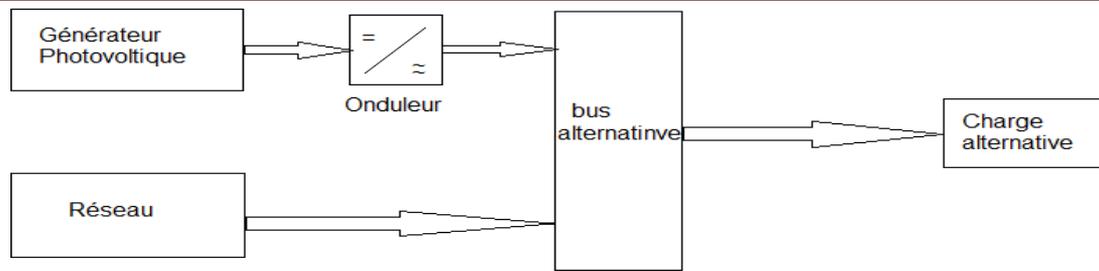


Figure I. 2. Configuration du système hybride à bus alternatif [6].

### I. 3.3 Les Avantages et les inconvénients d'un système hybride

#### ➤ Les Avantages

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.

#### ➤ Les Inconvénients

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel [7]

### L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est générée par le déplacement des masses d'air, qui est indirectement causé par l'ensoleillement de la Terre. Le réchauffement de certaines régions et le refroidissement d'autres créent une différence de pression, ce qui entraîne le mouvement continu des masses d'air [8].

Grâce à l'évolution de la technologie des éoliennes, celles-ci sont devenues ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Un aérogénérateur, communément appelé "éolienne", est une machine qui utilise l'énergie cinétique du vent pour produire de l'énergie électrique.

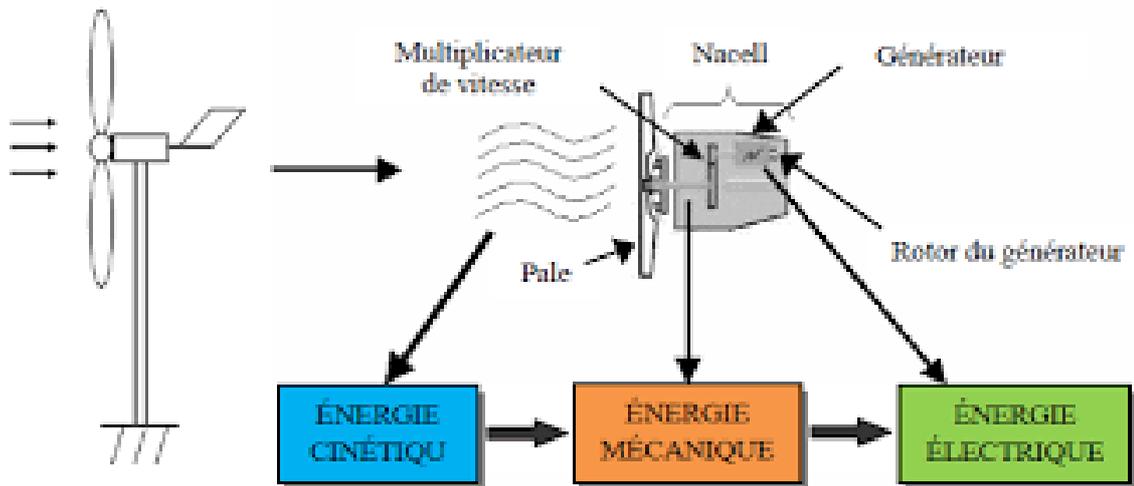


Figure I. 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent [8].

### Les composants d'une éolienne

Les principaux composants d'une éolienne sont montrés comme la figure I.4 :

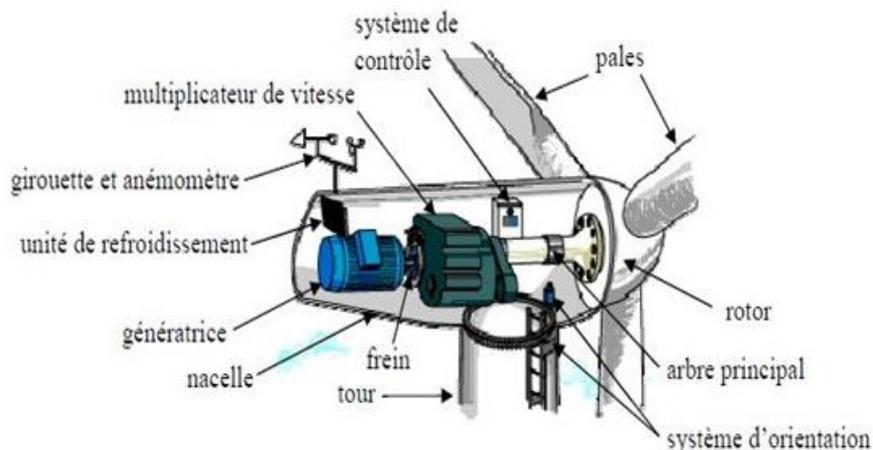


Figure I.5. Différentes parties d'une éolienne [9].

### Principe de Fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite [10].

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [10].

## Les types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

### ➤ Eoliennes à axe vertical

Un système de démarrage est nécessaire pour faire fonctionner ces éoliennes, car elles ne peuvent pas démarrer par elles-mêmes. Un avantage majeur des éoliennes à axe vertical est que le dispositif de génération électrique est situé au sol, ce qui évite la construction d'une tour, comme illustré dans la figure I.5 [11].

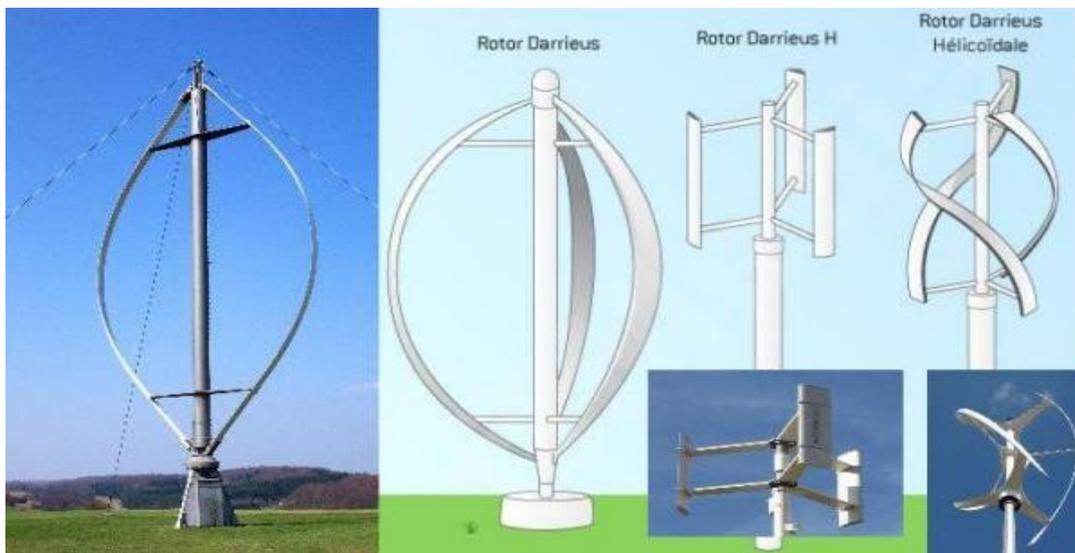


Figure I. 6. Eolienne à axe vertical [11].

### ➤ Eoliennes à axe horizontal

Actuellement, toutes les éoliennes commerciales connectées au réseau sont construites avec un rotor de type hélice monté sur un axe horizontal, également appelé arbre principal horizontal. Leur principal avantage réside dans leur rendement nettement supérieur par rapport à l'autre type d'éoliennes [12, 13].

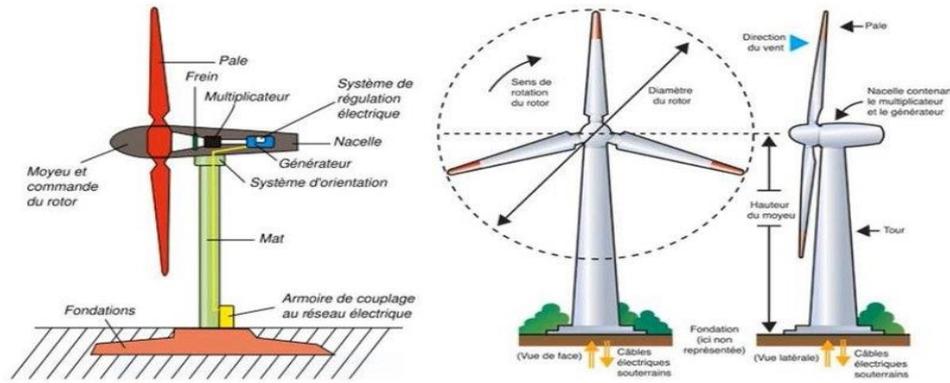


Figure I. 7.Eolienne à axe horizontal [12 ,13].

### Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

#### ➤ Avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [14].
- Chaque fois qu'un mégawatheure d'électricité est produit à partir de l'énergie éolienne, cela permet de réduire les émissions de CO2 de 0,8 à 0,9 tonne par an, qui seraient normalement générées par la production d'électricité à partir de sources thermiques [15].
- Le secteur de l'énergie éolienne connaît de loin le taux de croissance le plus élevé parmi toutes les sources de production d'électricité [16].

#### ➤ Inconvénients

- Le vent peut présenter des variations d'intensité irrégulières.
- Le coût de l'énergie éolienne est comparativement inférieur à celui des sources d'énergie classiques.
- La production d'énergie éolienne dépend de l'intensité des vents plutôt que de la demande en énergie [17].

### La pile à combustible

#### Définition

Une pile à combustible est un dispositif qui génère de l'énergie électrique en convertissant directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. Contrairement aux turbines et aux moteurs, elle ne comporte pas de pièces mécaniques en mouvement, ce qui la rend pratiquement silencieuse. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée en combustible (comme les hydrocarbures, les alcools, la biomasse, le gaz naturel et l'hydrogène) et en

Comburant (l'oxygène de l'air). Cela la distingue des batteries, des accumulateurs et d'autres types de piles, qui stockent une quantité limitée d'énergie électrique sous forme chimique et doivent soit être rechargés lorsque possible (comme les batteries de véhicules), soit être remplacés (comme les piles utilisées dans les postes de radio) [18].

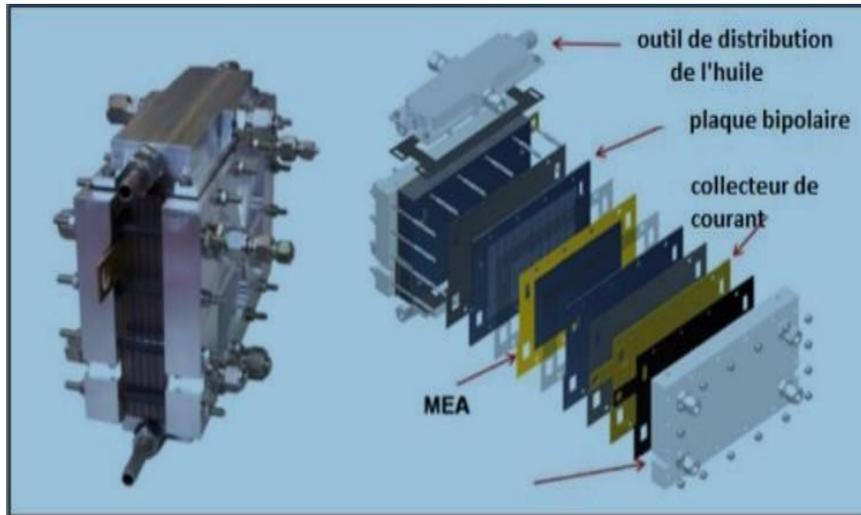


Figure I. 8. Une pile à combustible [18].

### Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEM

La pile à combustible PEM fonctionne selon le principe de production d'électricité, d'eau et de chaleur. Son fonctionnement repose sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau. Les réactions électrochimiques qui se produisent dans une pile à combustible PEM sont décrites par les équations suivantes [19] :



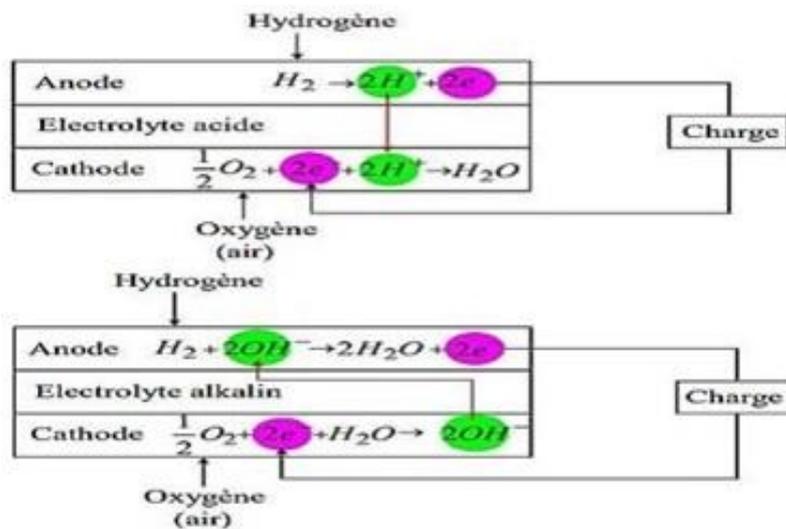


Figure I. 9. Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas).

Les types de piles à combustible

Les différents types de piles sont rappelés dans le tableau I.1 :

Tableau I. 1. Différents types de pile à combustible [20] [21].

Types de la pile à combustible	Ion	T(C°)	Applications typiques
Pile à combustible alcaline AFC (Alkaline fuel cell)	$OH^-$	500	Apollo
		200	Navette
Pile à combustible à membrane PEMFC spatiale (Proton exchange membrane fuel cell)	$H^+$	30	Véhicule, stationnaire
		100	
Pile à combustible au méthanol direct DMFC (Direct Methanol fuel cell)	$H^+$	20	portable
		90	
Pile à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphoric acid fuel cell)	$H^+$	220	stationnaire
Pile à combustible à carbonate fondu MCFC (Molten carbonate fuel cell)	$CO_3^{2-}$	650	stationnaire
Pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid oxyd fuel cell)	$O^{2-}$	500	Cogénération production centrale
		1000	

Domaines d'applications des piles PEM

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) est facile à utiliser grâce à son fonctionnement à basse température et à son électrolyte solide. Elle suscite l'intérêt des

Fabricants dans les applications portables, le transport automobile et les petites cogénérations. Elle offre une autonomie accrue et une recharge rapide pour les applications portables, elle ne produit pas de polluants dans les véhicules alimentés en hydrogène pur, et elle fonctionne efficacement dans les domaines de puissance faible à moyenne [22].

### **Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible**

#### ➤ **Avantage**

Parmi les bénéfices des piles à combustible, on peut mentionner les points suivants :

- Les piles à combustible présentent des rendements énergétiques élevés, même lorsqu'elles fonctionnent à charge partielle.
- Elles génèrent peu de bruit, ce qui se traduit par de faibles émissions sonores.
- Elles émettent peu de substances polluantes (cependant, les émissions dépendent du type de combustible utilisé).

#### ➤ **Inconvénients**

- Le principal défi des piles à combustible réside dans leur coût élevé.
- Leur durée de vie est réduite, notamment lorsque le courant fourni subit des variations importantes et fréquentes [23].

### **La batterie**

#### **Définition**

Les batteries sont des dispositifs essentiels pour le stockage et la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, et inversement. Elles sont largement utilisées dans les véhicules électriques et hybrides en raison de leur haute capacité énergétique, leur puissance spécifique élevée et leur coût abordable par rapport à d'autres technologies. Cependant, des recherches approfondies sont nécessaires pour améliorer la fabrication, la sécurité et le recyclage des batteries [24].

Les batteries sont largement utilisées dans de nombreuses applications en raison de leur mobilité. Elles sont essentielles pour les appareils portables tels que les ordinateurs et les téléphones, ainsi que pour les véhicules hybrides et électriques en pleine expansion. Des batteries performantes capables de stocker et de libérer de l'énergie de manière réversible pendant de nombreux cycles sont nécessaires. Leur fiabilité et leur efficacité énergétique élevée de plus de 97

% les rendent également attrayantes pour le stockage de l'électricité renouvelable et la régulation de l'offre et de la demande au niveau local [25].

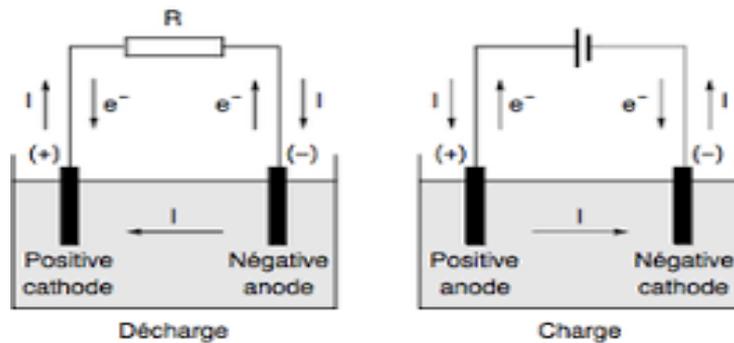


Figure I. 10. Décharge/charge d'un Batterie électrochimique [25].

### Principe de fonctionnement

Un accumulateur électrique comprend deux électrodes (positive et négative) immergées dans un électrolyte, séparées par une membrane poreuse appelée séparateur. Lors de la décharge, le matériau actif de l'électrode négative s'oxyde, libérant des électrons qui transitent à travers le circuit externe, alimentant un appareil. Les électrons parviennent ensuite à l'électrode positive, où ils sont capturés. Lorsque les matériaux actifs ne peuvent plus libérer ou absorber les électrons, l'accumulateur doit être rechargé [26].

### Les différents types de batteries

Il y a deux catégories de batteries :

- Les batteries primaires (batteries jetables) : elles sont conçues pour être utilisées une seule fois et ensuite jetées.
- Les batteries secondaires (batteries rechargeables) : elles sont conçues pour être rechargées et utilisées plusieurs fois. La plupart des batteries utilisées aujourd'hui, notamment dans les systèmes d'alimentation hybride, sont des batteries rechargeables. Il existe différents types de batteries rechargeables [27].

### Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exploré les principes fondamentaux du système hybride, qu'ils s'agit de leurs définitions, principes de fonctionnement, les avantages et les inconvénients ainsi que leurs composants et leurs domaines d'application.

Notre système hybride qui est composé d'une éolienne, pile à combustible et d'une batterie.

Nous allons maintenant examiner en détail la modélisation des composants du système hybride, qui sera le sujet abordé dans le prochain chapitre.

# **Chapitre II : modélisation du système hybride**

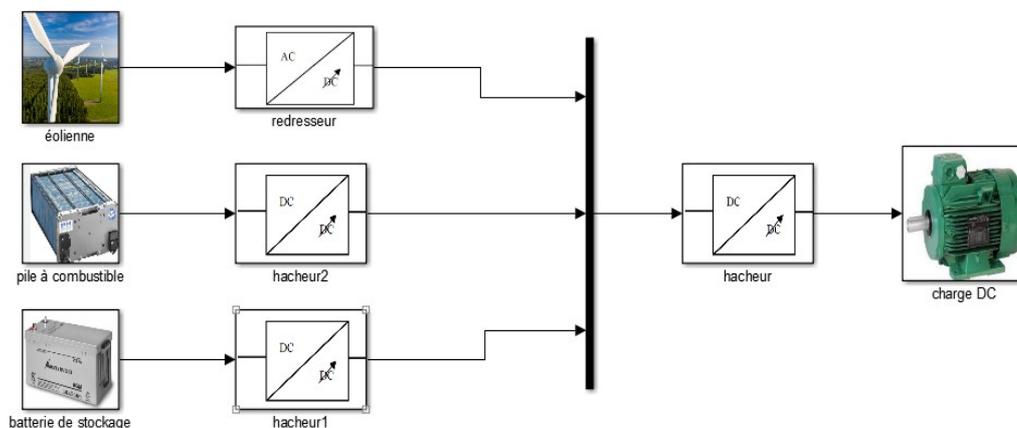
## Introduction

L'énergie éolienne, les piles à combustible et les batteries sont des sources d'énergies renouvelables parmi des plusieurs sources utilisées dans le domaine de la production d'énergie électrique. Leur modélisation est cruciale pour la conception, l'optimisation et l'intégration aux réseaux électriques. Les modèles permettent de prédire la production d'énergie éolienne en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques de l'éolienne. Pour les piles à combustible, la modélisation décrit les réactions chimiques, les transports et les pertes de performance. Pour les batteries, elle représente les processus de charge, les réactions chimiques et les interactions thermiques. Ces modèles guident la conception et facilitent l'intégration des systèmes pour une transition énergétique durable.

Dans ce chapitre nous aborderons la modélisation des composants du système hybride, où nous développerons et vérifierons des modèles mathématiques pour les différents composants ou sous-systèmes de notre système hybride se qui nous permis d'étudier les caractéristiques des sous système dans des conditions climatique variable.

## Structure d'un système électrique hybride

L'hybridation des sources implique la combinaison de deux ou plusieurs sources afin d'exploiter leurs différentes caractéristiques (autonomie, réversibilité, dynamique). Un exemple concret est celui des véhicules hybrides, qui associent deux ou plusieurs sources d'énergie de natures différentes pour la propulsion. Les systèmes électriques hybrides peuvent être représentés par la Figure (II.1), qui présente une structure générale permettant l'ajout ou la suppression de sources et de charges en fonction de la topologie du système.



**Figure II. 1.** Structure générale d'un exemple de système électrique hybride.

### Modélisation de la chaîne de production éolienne

La configuration choisie pour modéliser et simuler notre chaîne de conversion éolienne consiste en une voilure qui recueille l'énergie cinétique du vent et la transmet directement à une génératrice synchrone. Cette génératrice alimente ensuite un bus continu via un redresseur à diodes.

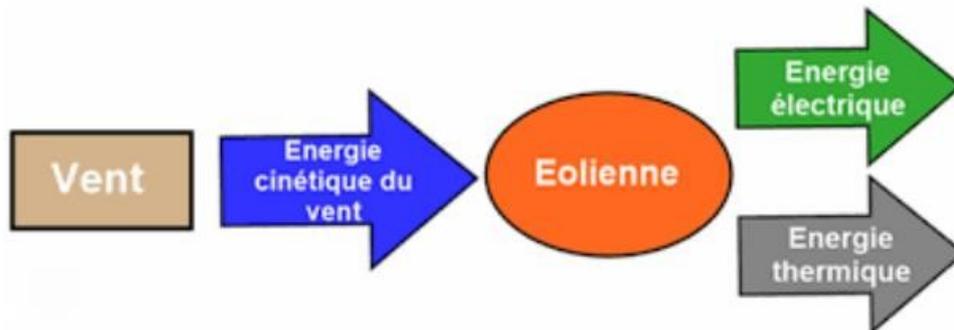


Figure II. 2.la chaîne de production d'une éolienne.

### Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz)

Il est impossible d'atteindre une récupération de 100% de l'énergie du vent en énergie mécanique pour une éolienne. Selon la théorie de Betz, développée en 1920 par le physicien allemand Albert Betz, il existe une limite maximale à la quantité d'énergie cinétique pouvant être extraite d'un flux d'air dans un espace ouvert, indépendamment du type d'éolienne utilisé [28],[29], [30].

Cette théorie repose sur certaines hypothèses simplificatrices, notamment :

- L'écoulement d'air est considéré comme incompressible, stationnaire et unidimensionnel, divisé en tranches uniformes.
- L'interaction de l'air avec le rotor de l'éolienne est modélisée par des cylindres infinis en amont et en aval.
- L'interaction du vent environnant avec le sillage de l'éolienne est négligée.

Selon les calculs de Betz :

La puissance théorique maximale récupérable par une éolienne est égale à  $16/27$  de la puissance incidente du vent traversant l'éolienne.

Cette limite est atteinte lorsque la vitesse du vent est réduite d'un facteur de trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne. La puissance incidente du vent est une mesure cinétique qui dépend de la surface exposée au vent par l'éolienne, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air.

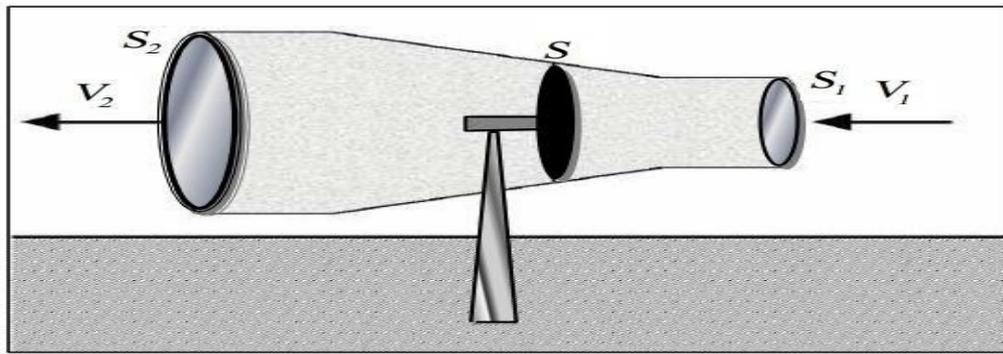


Figure II. 3. Tube de courant autour d'une éolienne.

On a donc :

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \tag{II.1}$$

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} \tag{II.2}$$

La soustraction de l'équation (II.1) par l'équation (II.2) conduit à:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) \tag{II.3}$$

La force exercée par le vent sur le capteur peut être exprimée :

$$F = (P_1 - P_2) \cdot S = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) \cdot S = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \cdot (V_1 - V_2) \tag{II.4}$$

La force exercée par le vent sur le capteur peut également être exprimée en utilisant la loi de Newton. Voici une reformulation :

$$F = m \cdot \frac{dV}{dt} = D_m \cdot \Delta V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \tag{II.5}$$

Dans le cas considéré, le débit massique reste constant :

$$D_m = \rho \cdot S \cdot V = \text{cst}$$

$D_m$ : Débit massique d'air,

L'égalité entre les expressions (II.4) et (II.5) implique que la vitesse  $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$ , et la puissance

Développée par cette force sur les pales peut être reformulée de la manière suivante :

$$P_F = F \cdot V = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) \cdot S \cdot V \tag{II.6}$$

Avec :

$F$  : Force exercée par l'air sur le capteur éolien.

$P_F$ : Puissance développée par la force exercée.

Si nous exprimons cette puissance en fonction de  $x = \frac{V_2}{V_1}$  et de  $P_0$ , la puissance incidente du vent non perturbé peut être reformulée de la manière suivante :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (II.7)$$

On obtient :

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{1+x}{2} \quad (II.8)$$

Et :

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} (1 - x^2) (1 + x) \quad (II.9)$$

La limite de Betz, également connue sous le nom de "limite de rendement de Betz", est atteinte lorsque le coefficient de puissance  $C_P$  atteint sa valeur maximale, qui est de  $C_P = \frac{16}{27}$ , lorsque

$$x = \frac{1}{3} .$$

$$P_{\text{extrate}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{incident}} \quad (II.10)$$

$$P_{\text{incidente}} = P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{\text{amont}}^3 \quad (II.11)$$

Lorsque :

$$V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (II.12)$$

Avec :

$x$  : Ratio de vitesse.

$P$  : Pression.

$V$  : Vitesse de l'air.

$P_0$ : La puissance incidente du vent non perturbé.

Et :

$\rho$  : masse volumique de l'air (1,20 Kg/ $m^3$  pour l'air à 20°C).

$S$  : Surface balayée par les pales de la turbine éolienne en ( $m^2$ ).

$V_{amont}$  : vitesse incidente (amont) du vent en m/s.

Le calcul effectué pour déterminer le maximum de la limite de Betz repose sur certaines hypothèses, ce qui en fait une estimation maximale plutôt qu'un résultat atteignable. Des calculs plus avancés et modernes, cités dans la référence [31], démontrent en réalité que ce maximum est plus bas. La limite de Betz se réfère à la réduction d'un tiers de la vitesse du vent à la limite, ce qui nécessite une augmentation de trois fois la surface de sortie pour maintenir le même débit. Cette limite théorique, connue sous le nom de limite de Betz, définit la puissance maximale qui peut être extraite pour une vitesse de vent donnée. Cependant, il est important de noter que cette limite théorique n'est jamais atteinte en pratique. Chaque éolienne a son propre coefficient de puissance, exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$ , qui représente le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance d'un aérogénérateur peut être défini en utilisant la relation suivante :

$$C_P = \frac{P_{\text{extrate}}^{\text{max}}}{P_{\text{incidente}}} \quad (\text{II.13})$$

Par conséquent, on peut exprimer cela de la manière suivante:

$$P_{\text{extrate}}^{\text{max}} = C_P(x) \cdot P_{\text{incidente}} = \frac{1}{2} \cdot C_P(x) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{II.14})$$

Et :

$$\lambda = \frac{R_P \cdot \Omega_{t_1}}{V_1} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$\Omega_{t_1}$  : La vitesse de rotation avant multiplicateur (axe lent).

$R_P$  : Le rayon de pale de l'éolienne.

$C_P$  : Coefficient de puissance.

Il convient de souligner que le coefficient de puissance  $C_P$  peut être influencé par le nombre de pales de la turbine (1, 2, 3 ou 4), mais sa valeur restera toujours inférieure à la limite de Betz (0,59). De plus, pour une turbine donnée, ce coefficient peut également varier en fonction de l'angle de calage, qui représente l'inclinaison des pales [32].

### Fonctionnement optimal d'une éolienne

Le diagramme de puissance sur l'arbre, présenté dans la Figure II.3, illustre les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. On peut distinguer trois zones principales :

Zone 1 : Dans cette zone, le vent n'est pas suffisamment fort pour faire fonctionner la turbine. Par conséquent, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont toutes deux égales à zéro.

Zone 2 : Lorsque le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$ , la turbine peut démarrer. Une fois le démarrage effectué, l'éolienne fonctionne de manière à extraire la puissance maximale disponible pour un fonctionnement optimal. Cette zone s'étend jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$ , qui correspond aux valeurs nominales de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation finale.

Zone 3 : Lorsque le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, il est nécessaire de maintenir la vitesse de rotation et la puissance mécanique à leurs valeurs nominales afin de prévenir tout dommage à l'éolienne. Pour ce faire, des limitations peuvent être mises en place, telles que l'orientation des pales de l'éolienne pour réduire son rendement (augmentation de l'angle de calage des pales). Dès que le vent atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est activée afin d'éviter toute destruction de celle-ci [33].

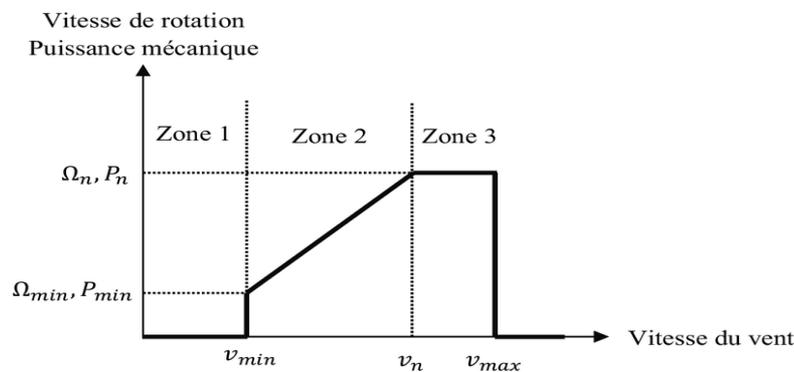


Figure II. 4. Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [33].

### Modélisation de la turbine éolienne

La simulation de la turbine utilise la relation du couple associée à la caractéristique  $C_p(\lambda)$ . Ainsi, le couple de la turbine peut être déterminé en utilisant la relation suivante [34] :

$$T_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v^3}{G \cdot \Omega_t} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

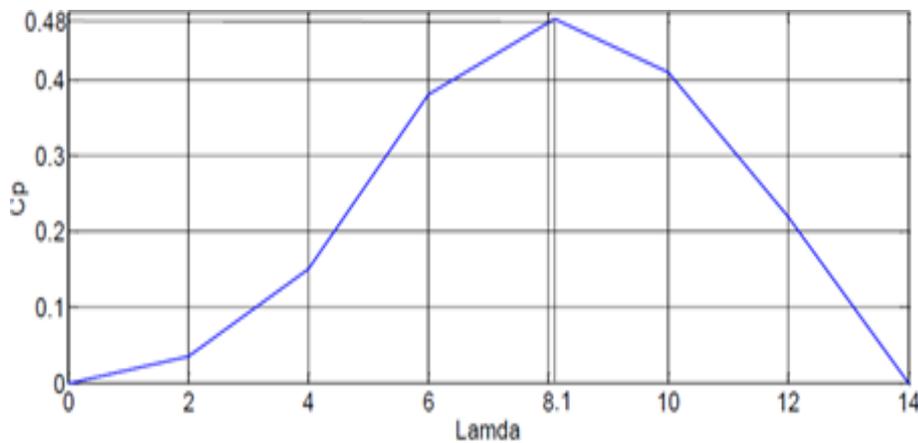
$S$ : La surface de la turbine ( $S=\pi R^2$ ).

$\rho$  : Représente la densité de l'air (dans les conditions normales,  $\rho=1.225 \text{ Kg /m}^3$  ).

$V_v$  : La vitesse moyenne du vent.

**Caractéristique  $C_p$  de la voilure**

Les éléments essentiels de cette courbe comprennent le rapport de vitesse optimal en bout de pales ( $\lambda_{opt}$ ) et le coefficient de puissance maximal ( $C_p^{opt}$ ), qui sont respectivement déterminés par les équations suivantes. La caractéristique de la voilure utilisée dans l'étude de ce système éolien est présentée dans la Figure (II.5).



**Figure II. 5.** Caractéristique  $C_p$  ( $\lambda$ ).

L'expression de la puissance récupérée par la turbine éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_v^3 \tag{II.17}$$

Avec :

$A_t$ : La surface balayée par la turbine éolienne.

$\rho$  : La masse volumique de l'air.

$V_v$ : La vitesse du vent.

La vitesse de la turbine éolienne est exprimée par la relation suivante :

$$\Omega_t = \frac{V_v \cdot \lambda}{R} \tag{II.18}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{\sigma} \tag{II.19}$$

Avec :

$T_t$  : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.

$G$  : le gain du multiplicateur.

$\Omega_t$  : La vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega$  : la vitesse de rotation à l'entrée de la génératrice.

### Le multiplicateur de vitesse

Le modèle mathématique du multiplicateur de vitesse, qui permet de synchroniser les différentes vitesses dans le système de transmission, est décrit par les équations suivantes:

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.20})$$

### Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP

La modélisation précise de la génératrice synchrone est d'une importance capitale pour la conception de systèmes de contrôle performants. Cela nécessite de décrire son comportement à l'aide d'un modèle mathématique. La génératrice synchrone à aimants permanents, dans sa configuration complète, présente une structure complexe. La figure illustre la structure générale d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents (II.6).

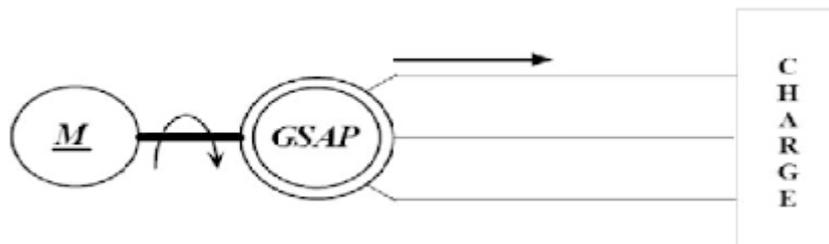


Figure II. 6. Représentation symbolique de la GSAP [35].

### Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents utilise certaines hypothèses simplificatrices afin de faciliter son étude et son exploitation. Ces simplifications sont basées sur les propriétés des machines à courant alternatif mentionnées précédemment:

$$\begin{cases} V_a = -R_s \cdot i_a - \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = -R_s \cdot i_b - \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = -R_s \cdot i_c - \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

$\varphi_{a,b,c}$  : sont les flux totaux induits dans les phases a, b et c du stator.

### Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé

Les équations différentielles du système de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) dans le référentiel de Park peuvent être exprimées de la manière suivante :

#### Equations électriques

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot i_d - \frac{d\varphi_d}{dt} + m \cdot \varphi_q \\ V_q = -R_s \cdot i_q - \frac{d\varphi_q}{dt} - m \cdot \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

#### Equations des flux magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d \cdot i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q \cdot i_q \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

#### L'équation mécanique

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} - \mathcal{G} = C_m - T_{em} \quad (\text{II.24})$$

La représentation schématique des enroulements de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) dans le repère de Park généralisé (d, q) est illustrée par la figure (II.7).

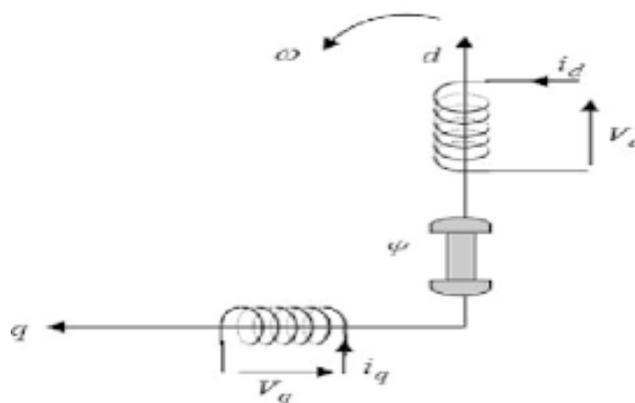


Figure II. 7. Schéma représentatif des enroulements de la (GSAP) dans le plan (d, q) [36].

**Modélisation de redresseur**

Le redresseur est un dispositif électronique qui permet de convertir l'énergie d'une source alternative en énergie continue. Cela peut être illustré par le schéma suivant :

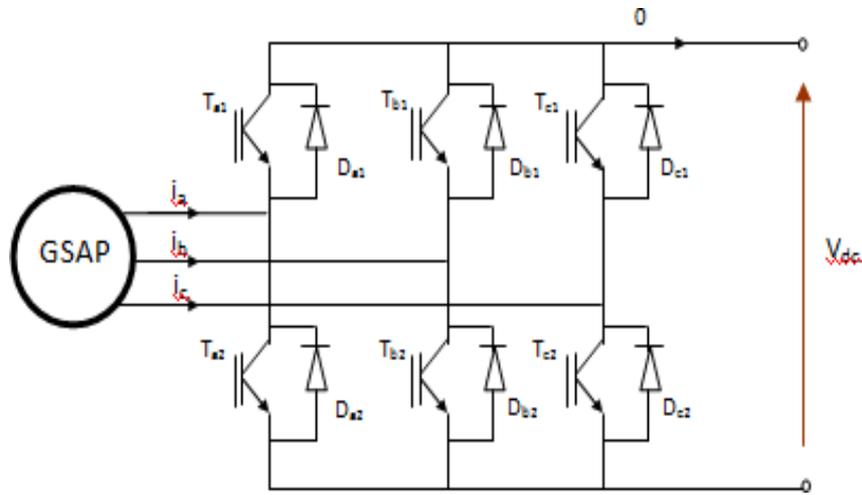


Figure II. 8. Schéma du redresseur MLI.

La matrice de connexion du redresseur peut être représentée par l'équation matricielle suivante [37] :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.25}$$

$$I_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \tag{II.26}$$

Avec :

$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ : Tensions de références.

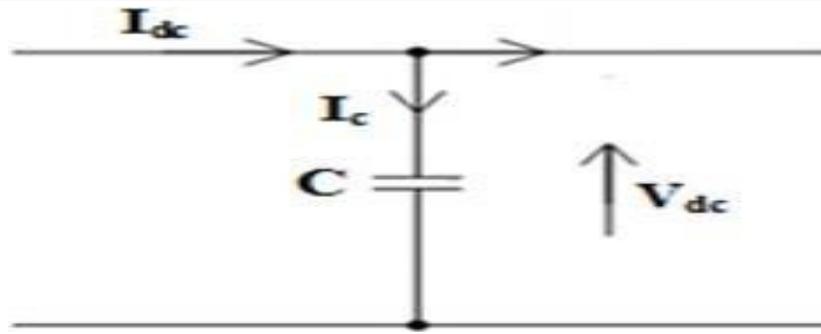
$V_{dc}$  : Tension redressée.

$I_{dc}$  : Courant modulé par le redresseur.

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

**Modélisation du bus continu**

La capacité du bus continu est utilisée pour stabiliser la tension en lissant ses variations. La tension du bus continu évolue en intégrant le courant qui circule à travers la capacité :

Figure II. 9.le bus continu  $V_{dc}$ .

On a:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} I_c \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$I_c$  : Le courant qui traverse le condensateur.

### Modélisation de pile à combustible

Les piles à combustible sont des dispositifs qui transforment directement l'énergie chimique d'un combustible en électricité. Elles sont composées de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, comme une membrane. L'oxydation du combustible, principalement l'hydrogène, à l'anode génère des électrons qui circulent à travers un conducteur externe jusqu'à la cathode. Là, ils réagissent avec l'oxydant et produisent de l'électricité. Une différence majeure entre les piles à combustible et les batteries rechargeables réside dans leur capacité à produire de l'énergie électrique tant que le combustible et l'oxydant sont fournis aux électrodes. Pour augmenter la tension, plusieurs piles peuvent être connectées en série pour former un empilement de piles à combustible [38].

La performance d'une pile à combustible est représentée par une courbe de polarisation qui comprend trois composantes principales : les pertes d'activation, les pertes ohmiques et les pertes de concentration.

La tension nominale d'une cellule peut être calculée en soustrayant ces pertes à la tension théorique. Les caractéristiques (tension-courant) de la cellule en régime de base sont illustrées dans la figure (II.10).

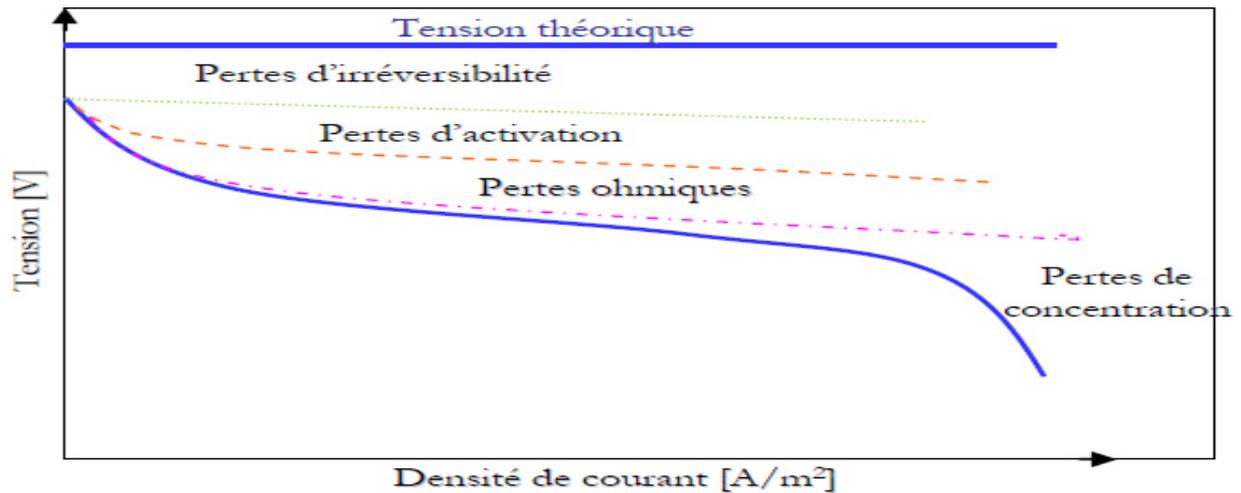


Figure II. 10. Représente la courbe de polarisation d'une pile à combustible.

### Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible exploite l'hydrogène et l'oxygène afin de conduire une réaction chimique. L'hydrogène subit une dissociation en protons et électrons. La réaction chimique peut être décrite selon les termes suivants :



La tension de sortie d'une pile à combustible, notée  $V_{pac}$ , est obtenue en multipliant le nombre de cellules ( $N$ ) constituant la pile à combustible par la tension de sortie d'une cellule individuelle ( $E$ ). Cette relation peut être exprimée comme suit:

$$V_{pac} = N \times E \quad (II.29)$$

La tension de sortie d'une cellule individuelle est définie par l'expression suivante :

$$E = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.30)$$

Avec :

$N$  : Le nombre des cellules de la pile.

$E_{Nernst}$  : La tension de Nernst (volt).

$V_{act}$ : Pertes d'activation (volt).

$V_{ohm}$ : Pertes ohmiques (volt).

$V_{conc}$  : Pertes de concentration (volt).

**La tension de Nernst**

La valeur maximale du potentiel électrique ou de la tension produite par une cellule est déterminée par [39]:

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F} (T - T_0) + \frac{RT}{2F} [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (II.31)$$

Avec :

$\Delta G$ : Le changement d'énergie libre (J/K.mol).

$\Delta S$ : Le changement d'entropie (J/K.mol).

$F$ : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol).

$T$  : La température absolue opérationnelle.

$T_0$  : La température de référence (K).

$R$  : La constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K·mol) .

L'équation de Nernst est exprimée avec une forme arrangée incluant un calcul numérique :

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (II.32)$$

Les pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène sont les suivantes :

$$P_{H_2} = 0.5 P_{H_2O}^{Sat} \left[ \exp \left( - \frac{1.635 \cdot I / A}{T^{1.334}} \right) \cdot \frac{P_{anode}}{P_{H_2O}^{Sat}} - 1 \right] \quad (II.33)$$

$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{Sat} \left[ \exp \left( \frac{-4.192 \cdot I / A}{T^{1.334}} \right) \cdot \frac{P_{cathode}}{P_{H_2O}^{Sat}} - 1 \right] \quad (II.34)$$

Avec :

$P_{anode}$  : La pression de l'hydrogène à l'anode.

$P_{cathode}$ : La pression de l'oxygène à la cathode.

$P_{H_2O}^{Sat}$  : La pression de saturation d'eau.

La pression de saturation de l'eau  $P_{H_2O}^{Sat}$  est calculée en appliquant la formule suivante :

$$\log_{10} = -2.18 + 2.95 \cdot 10^{-2} T_c - 9.19 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 1.44 \cdot 10^{-7} T_c^3 \quad (II.35)$$

Avec :

$$T_c = T + 273.15 \quad (\text{II.36})$$

La température T est en Kelvin, tandis que  $P_H$  et  $P_O$  sont exprimés en bar.

La tension théorique de l'enthalpie de Nernst est d'environ 1,299 V, cependant, même en l'absence de charge, cette valeur n'est jamais atteinte [40].

### Les Pertes d'activation

Les pertes d'activation se manifestent lors de l'initiation des réactions chimiques et sont principalement attribuables aux réactions cathodiques. L'équation suivante établit la relation entre les pertes d'activation et la densité de courant [41]:

$$V_{act} = \frac{R \cdot T}{a \cdot z F} \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) = T \cdot [a + b \ln(I)] \quad (\text{II.37})$$

De plus, l'équation empirique pour  $V_{act}$ , qui est donnée en [42], inclut l'ajout d'une constante ( $\eta_0$ ) à l'équation (II.37) de la manière suivante.

$$V_{act} = \eta_0 + (T - 298) \cdot a + T \cdot b \cdot \ln(I) = V_{act_1} + V_{act_2} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$\eta_0$ , a, b : constantes empirique.

$V_{act_1} = (\eta_0 + (T - 298) \cdot a)$  : est la chute de tension affectée seulement par température interne de la de la pile à combustible.

$V_{act_2} = (T \cdot b \cdot \ln(I))$  : est dépendante à la fois du courant et de la température.

### Les pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont causées par la résistance rencontrée par les électrodes, les plaques bipolaires et l'électrolyte lors du passage des électrons et des protons. On peut quantifier cette chute de tension en utilisant la loi d'Ohm s'écrit :

$$V_{ohm} = I R_{ohm} \quad (\text{II.39})$$

$R_{ohm}$ : La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons (notée R) est déterminée en fonction du courant et de la température, conformément à la relation suivante[43]:

$$R_{ohm} = R_{ohm_0} + K_{RI} \cdot I - K_{RT} \cdot T \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$R_{ohm_0}$  : La partie constante de  $R_{ohm}$  .

$K_{RI}$  Et  $K_{RT}$  : sont des constantes empiriques.

**Les pertes de concentration**

Les chutes de tension dues à la concentration surviennent lorsque les réactifs sont insuffisants. Lorsque la densité de courant devient élevée, la diffusion des gaz dans les électrodes n'est pas assez rapide pour soutenir la réaction. On peut exprimer ces pertes à l'aide de la relation suivante :

$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{lim}} \right) \tag{II.41}$$

Avec :

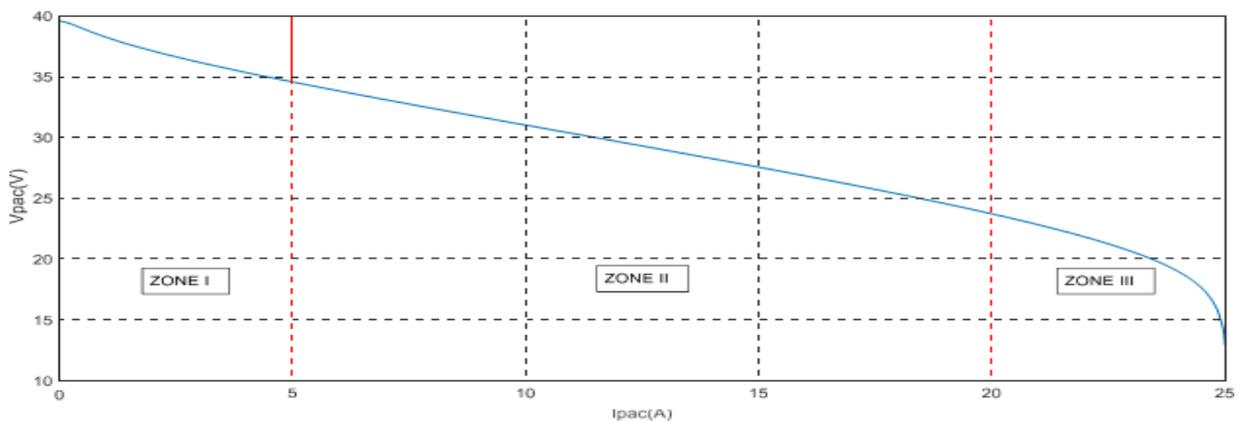
$I_{lim}$  : Courant de limitation ou le courant maximal.

z: est le nombre d'électrons participants à la réaction.

**Caractéristique de la pile combustible PEMFC**

**II.8.2.1. Caractéristique tension-densité de courant de la pile PEMFC**

La courbe (II.11) montre comment la tension de sortie d'une pile PEMFC évolue en fonction de la densité de courant. Elle révèle que les caractéristiques de la pile ne sont pas linéaires : à chaque augmentation du courant, la tension diminue. Trois domaines distincts peuvent être identifiés sur la courbe caractéristique V-I de cette pile, maintenue à une température constante de 25°C.



**Figure II.11.** Caractéristique  $V_{pac} = f(I_{pac})$  de la pile PEMFC.

1. Région de polarisation d'activation zone I : Cette région correspond à de faibles densités de courant et est principalement influencée par les polarisations d'activation anodique et cathodique. Ces phénomènes sont les plus importants lorsque le courant est faible, et ils contribuent à une diminution de la tension de sortie de la pile.
2. Région résistive zone II: Dans cette région, la courbe V-I montre une relation linéaire, ce qui indique un comportement résistif à des densités de courant moyennes. Les principales sources de résistance dans cette région sont le transport des protons à travers la membrane et les autres composants de l'assemblage de la cellule. Les diffuseurs et les plaques bipolaires, généralement fabriqués en carbone, présentent une conductivité électronique élevée, ce qui entraîne des pertes de tension relativement faibles.
3. Région de limitation par diffusion et noyage zone III : Cette région, bien qu'elle ne soit pas représentée sur la courbe, est observée à des densités de courant élevées. Les phénomènes de limitation par diffusion et de noyage deviennent prédominants, affectant la pression des différentes espèces chimiques dans les canaux de la pile à combustible. Ces effets sont dus au transport des gaz et peuvent considérablement détériorer les performances de la pile. Par conséquent, il est important de ne pas utiliser cette région de fonctionnement.

### La courbe de puissance

La figure (II.12) présente le graphique de la densité de puissance en fonction de la densité de courant pour une pile à combustible PEMFC de 5 kW. Ce graphique représente la réponse de la pile à une variation de courant sous forme de rampe. La densité de puissance est définie comme le produit du courant et de la tension.

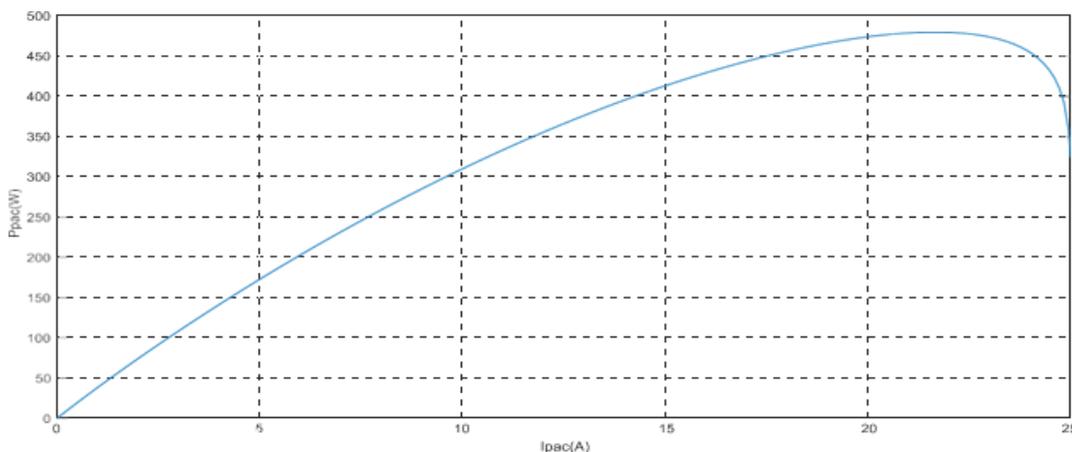


Figure II.12. Caractéristique  $P_{pac}=f(I_{pac})$  de la pile PEMFC.

La caractéristique de densité de puissance-densité de courant d'une pile à combustible PEMFC montre une augmentation progressive de la puissance jusqu'à atteindre un pic à un certain moment, suivi d'une diminution ultérieure.

**Influence de la température**

Les figures ci-dessous illustrent les caractéristiques (V-I) figure (II.13) et (P-I) figure (II.14) pour différentes températures T (°C) telles que 10, 20, 30 et 50. Ces graphiques mettent en évidence l'influence de la variation de la température ambiante sur la tension et la puissance d'une pile à combustible, et montrent comment ces paramètres sont affectés par les changements de température.

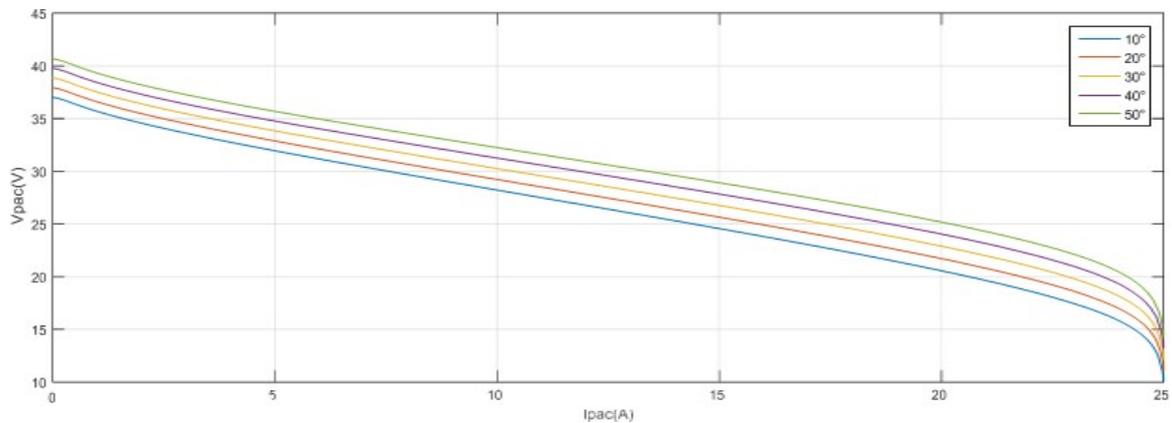


Figure II.13. Influence de la température  $V_{pac}=f(I_{pac})$ .

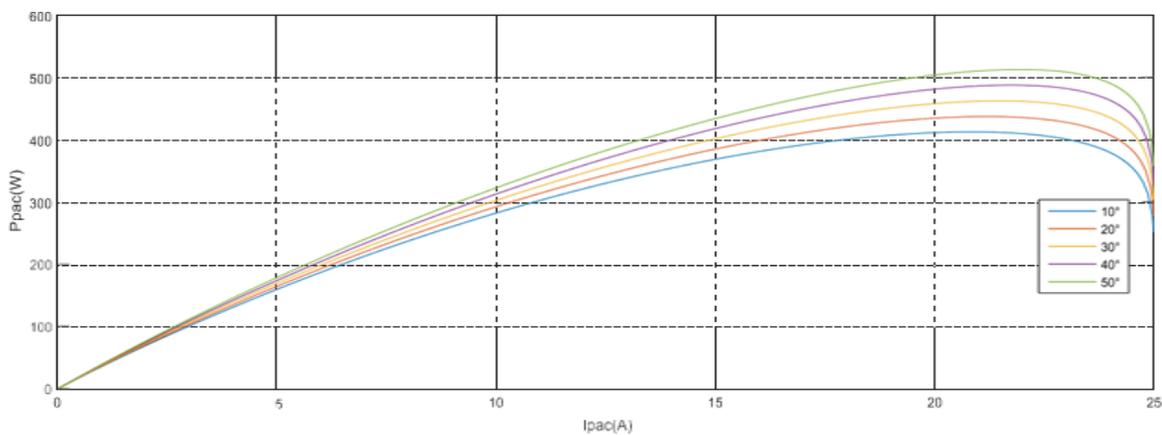


Figure II.14. Influence de la température  $P_{pac}=f(I_{pac})$ .

La figure (II.13) démontre une relation proportionnelle entre la température et la tension. L'augmentation de la température entraîne une augmentation de la tension, car la température de fonctionnement accrue réduit la résistance ohmique de l'électrolyte. La figure (II.14) illustre comment la densité de puissance varie en fonction de la température.

L'augmentation de la température présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle améliore la cinétique électrochimique des réactions au niveau des électrodes, ce qui réduit les pertes d'activation. De plus, elle favorise la diffusion des gaz dans les électrodes, ce qui permet d'augmenter le courant limite de la pile. Enfin, elle contribue à réduire les pertes ohmiques dans la membrane en augmentant sa conductivité ionique.

Cependant, il convient de noter que des températures élevées peuvent assécher la membrane, ce qui entraîne une augmentation des pertes ohmiques en raison de l'augmentation de sa résistance.

**Taux d'hydrogène consommé**

Chaque gaz sera traité individuellement en utilisant les équations des gaz parfaits qui lui sont applicables. Dans cet exemple, nous considérerons l'hydrogène :

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} \cdot R \cdot T \tag{II.42}$$

Avec :

$V_{an}$  : est le volume de l'anode (en litre) .

$n_{H_2}$  : est le nombre de mole d'hydrogène dans le canal anode.

R : la constante universelle des gaz parfait (8,31447 J/mol/K).

T : représente la température en Kelvin (K).

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \tag{II.43}$$

Avec :

$q_{H_2}$  : représente le débit molaire de l'hydrogène (kmol/s).

Le débit molaire d'hydrogène dépend de trois facteurs importants : le débit d'entrée d'hydrogène, le débit de sortie d'hydrogène et le débit d'hydrogène pendant la réaction [44] :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{R}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \tag{II.44}$$

On peut exprimer la relation entre le flux d'hydrogène et le courant de la cheminée de la manière suivante :

$$P_{H_2}^r = \frac{NsI_{pac}}{2F} = 2I_{pac} \times K_r \tag{II.45}$$

$$K_r = \frac{Ns}{4} \tag{II.46}$$

Avec :

$K_r$  : est une constante de paramètre de modélisation [kmol/(s·A)].

$N_s$ : Le nombre des cellules de la pile.

$I_{pac}$ : Intensité du courant d'une cellule de la pile à combustible (A).

En dérivant l'équation des gaz parfaits, on obtient une relation spécifique entre la pression partielle et le débit d'entrée du combustible. Les équations donnent la pression partielle d'hydrogène et d'oxygène (II.39), (II.41) [45, 46].

En utilisant l'équation (II.39), l'équation (II.41) de la manière suivante :

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1+r_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad (II.47)$$

Avec :

$r_{H_2}$  : est la valeur du temps de réponse du système associée au débit d'hydrogène en seconde.

$$r_{H_2} = (V_{an}) / (K_{H_2} RT) \quad (II.48)$$

### Modélisation de l'électrolyseur

Un électrolyseur est un dispositif qui utilise l'énergie électrique pour effectuer des réactions chimiques. Dans le contexte de notre étude, les électrolyseurs utilisés réalisent l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène. Un électrolyseur est défini comme un appareil qui sépare l'eau ( $H_2O$ ) en hydrogène ( $H_2$ ) et oxygène ( $O_2$ ) selon l'équation (II.49).



L'électricité est essentielle pour le processus de production d'hydrogène. Les caractéristiques U-I (tension-courant) d'un électrolyseur avancé sont définies de la manière suivante [47] :

$$V_{\text{élec\_cell}} = V_{\text{rév}} + \frac{r_1+r_2T}{A} I + K_{\text{éle}} \ln \left( \frac{K_{T_1} + \frac{K_{T_1}}{T} + \frac{K_{T_3}}{T^2}}{A} I + 1 \right) \quad (II.50)$$

Avec :

$V_{\text{élec\_cell}}$  : La tension aux bornes de la cellule (V).

$V_{\text{rév}}$ : La tension réversible de cellule(V).

$r_1 r_2$ : les paramètres de résistance ohmique ( $\Omega \cdot m^2 \cdot \Omega \cdot m^2 / ^\circ C$ ).

$K_{\text{éle}}, K_{T_1}, K_{T_2}, K_{T_3}$ : les paramètres de surtension (V), ( $m^2/A$ ), ( $m^2$ ) . ( $^{\circ}C/A$ ), ( $m^2$ )( $^{\circ}C^2/A$ ).

La tension minimale ou réversible  $V_{\text{rév}}$  d'une cellule d'électrolyseur est définie comme l'énergie libre  $\Delta G$  nécessaire pour la décomposition de la molécule d'eau. Cette tension peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$V_{\text{rév}} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (\text{II. 51})$$

$\Delta G$  : est l'énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol) ;

F : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) ;

$V_{\text{rév}}$  : peut être exprimé comme une équation empirique comme :

$$V_{\text{rév}} = V_{\text{rév}}^0 - K_{\text{rév}}(T - 25) \quad (\text{II.52})$$

Avec :

$V_{\text{rév}}^0$  : est la tension de cellule réversible à l'état standard (V) ;

$K_{\text{rév}}$  : est coefficient empirique de température de  $V_{\text{rév}}$  ( $V/^{\circ}C$ ) ;

Dans le cas d'un électrolyseur constitué de  $n_c$  cellules en série, la tension de sortie est déterminée par :

$$V_{\text{élec}} = n_c \cdot V_{\text{élec\_cell}} \quad (\text{II.53})$$

### Débit de production d'Hydrogène

D'après la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au taux de transfert d'électrons aux électrodes. Lorsqu'il s'agit d'un électrolyseur composé de plusieurs cellules connectées en série, le taux de production totale d'hydrogène peut être exprimé de la manière suivante :

$$n_{H_2\text{prod}} = \eta_F \frac{NcI}{2F} \quad (\text{II. 54})$$

Avec :

$n_{H_2}$  : Débit de production d'Hydrogène (mole/sec).

$\eta_F$  : Rendement faradique ; est le rapport entre la quantité réelle et théorique de production maximale d'hydrogène.

Une expression empirique pour représenter l'efficacité de Faraday est fournie par [48] :

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I}{A}\right)^2} f_2 \quad (\text{II. 55})$$

Avec :

$f_1, f_2$ : ( $\text{mA}^2\text{cm}^{-4}$ ), Les paramètres utilisés pour le calcul du rendement faradique.

### Modèle thermique

La température de fonctionnement de l'électrolyseur a un impact sur ses performances. Le taux de variation de la température est proportionnel à la différence entre le taux de génération de chaleur ( $g_{\text{én}}$ ) et les pertes de chaleur ( $Q_{\text{loss}}$ ), ainsi que le taux de refroidissement par chaleur ( $Q_{\text{cool}}$ ). On peut exprimer cela de la manière suivante :

$$C_t \frac{dT}{dt} = Q_{\text{gen}} - Q_{\text{loss}} - Q_{\text{cool}} \quad (\text{II.56})$$

Avec :

$C_t$  : est la capacité thermique globale de l'électrolyseur ;

$Q_{\text{gen}}$ : est la puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur.

Cette équation peut être exprimée comme :

$$Q_{\text{gen}} = \eta_c (V - V_{th}) \cdot I \quad (\text{II.57})$$

Avec :

$$V_{th} = \frac{-\Delta H}{2F}, \text{ est la tension thermique.} \quad (\text{II.58})$$

$Q_{\text{pert}}$ : La perte de puissance calorifique.

Elle peut être calculée à l'aide de :

$$Q_{\text{pert}} = \frac{(T - T_a)}{R_t} \quad (\text{II.59})$$

$R_t$ : est résistance thermique de l'électrolyseur ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) ;

$T_a$ : est la température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;

$Q_{\text{refroidissement}}$  La perte de puissance calorifique dû au refroidissement, peut être exprimée par :

$$Q_{\text{refroidissement}} = C_{cm}(T_{cm_s} - T_{cm_e}) \quad (\text{II.60})$$

Avec :

$C_{cm}$  : est la capacité thermique de l'eau de refroidissement (J/°C).

$T_{cm,e}$  : est la température de l'eau de refroidissement d'entrée (°C).

$T_{cm,s}$  : est la température de l'eau de refroidissement de sortie (°C).

Peut être exprimée :

$$T_{cm,s} = T_{cm,e} + (T_{cm,s} - T_{cm,e}) \exp\left(-\frac{V_{AHX}}{C_{cm}}\right) \quad (II. 61)$$

Avec :

$V_{AHX}$ : Coefficient d'échange calorifique effectif pour le processus de refroidissement.

Peut être exprimée par :

$$V_{AHX} = h_{cond} + h_{conv} I \quad (II. 62)$$

$h_{cond}$  : Coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction (W/°C).

$h_{conv}$  : Coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection (W/ (°C.A)).

### Stockage d'hydrogène

Le réservoir de stockage d'hydrogène agit comme une source d'hydrogène pour la pile à combustible lorsque la production d'énergie éolienne est insuffisante [49] :

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (II.63)$$

L'évolution du système de stockage de  $H_2$  peut être décrite par l'équation (II.56). La pression dans le réservoir peut être exprimée de la manière suivante [50] :

$$P = \frac{nRT}{V-nb} - a \frac{n^2}{V^2} \quad (II. 64)$$

Avec :

P : Pression (pascale).

n : Nombre de moles (mol).

R : Constante de gaz universelle.

T : Température (K).

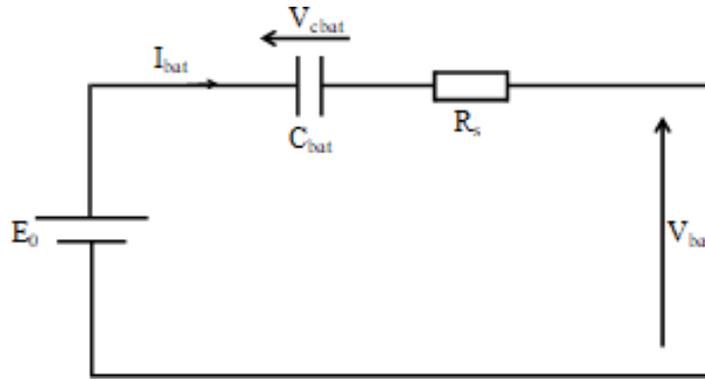
V : Volume de stockage (m<sup>3</sup>).

$T_{cr}$  : Température critique (K).

$P_{cr}$  : Pression critique (Pa).

**Modélisation de la batterie**

Pour la modélisation d'une batterie, on utilise le schéma électrique suivant.



**Figure II.15.** Modèle R-C de la batterie.

Ce modèle inclut une tension à vide de la batterie ( $E_0$ ) pour représenter sa tension en l'absence de courant, un condensateur pour modéliser la capacité interne de la batterie ( $C_{bat}$ ) et une résistance interne ( $R_s$ ). La tension aux bornes de la batterie [51], exprimée par :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \tag{II.65}$$

On peut reformuler la définition de l'État de charge (EDC) de la batterie de la manière suivante:

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{II.66}$$

$Q_d$  : La quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$  .

$C_{bat}$  : La capacité (Ah) nominale de la batterie.

**Modélisation d'hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur)**

La structure d'un hacheur de type Buck-Boost est représentée dans la figure (II.16). Le convertisseur Buck-Boost fonctionne comme un inverseur de tension avec stockage inductif, ce qui signifie que la tension en sortie a toujours un signe opposé à la tension en entrée. Lorsque le transistor est fermé, le courant dans l'inductance augmente, ce qui entraîne le stockage d'énergie. Lorsque le commutateur est ouvert, la tension aux bornes de l'inductance s'inverse et l'énergie stockée est transférée vers la charge via la diode [52].

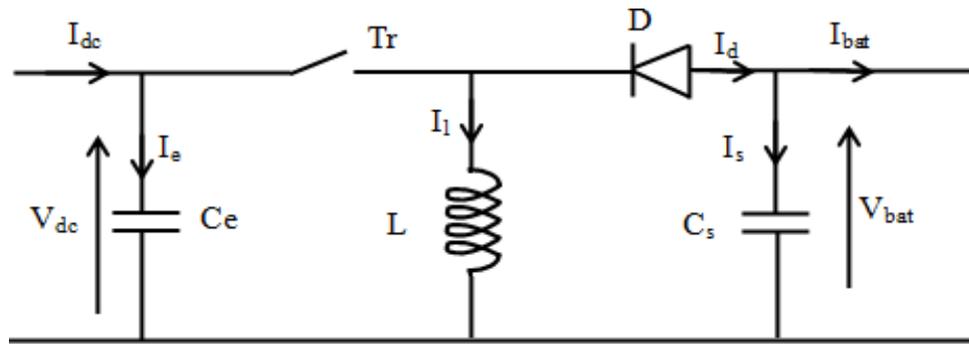


Figure II.16. Schéma d'un hacheur Buck-Boost.

Comme la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, nous pouvons reformuler l'équation décrivant le fonctionnement en conduction continue de la tension aux bornes de la batterie de la manière suivante:

$$V_{\text{bat}} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{\text{dc}} \quad (\text{II.67})$$

Si nous supposons que la puissance transférée entre la batterie et le bus est conservée, alors nous pouvons formuler cela de la manière suivante :

$$I_{\text{bat}} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{\text{dc}} \quad (\text{II.68})$$

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la modélisation de chaque élément de la chaîne de conversion hybride en s'appuyant sur des modèles préexistants présents dans la littérature.

Cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque composant de l'installation. On a constaté que les caractéristiques des différents générateurs (éolien, pile à combustible) présentent une forte non linéarité échangent avec des conditions (le vent, l'éolienne.....)

Afin de bien exploiter l'énergie fournie par ces sources on doit introduire des techniques des commandes et gestion qui sera l'objectif du prochain chapitre.

# **Chapitre III : Commande et gestions d'énergie du système hybride**

**Introduction**

Après avoir modélisé les différents composants du système, nous commencerons par initier nos efforts en optimisant la puissance à la sortie du générateur éolien à l'aide d'un algorithme MPPT classique. Après nous mettrons en place un contrôle pour la machine asynchrone à aimant permanent, afin de maintenir la tension du bus continu à un niveau fixe, indépendamment des fluctuations de la vitesse du vent. Pour assurer une gestion efficace de l'énergie, nous intégrerons des systèmes de stockage tels que des batteries et un réservoir d'hydrogène. Ces dispositifs permettront de charger et de décharger l'énergie, ainsi que de compenser tout déficit énergétique éventuel.

Dans le but d'assurer un approvisionnement énergétique continu et ininterrompu à la charge, nous mettrons en place un superviseur. Ce superviseur implémentera une stratégie soigneusement étudiée pour la gestion des flux d'énergie au sein de notre système.

**Le système de conversion éolienne**

Le système de conversion de l'énergie éolienne comprend une turbine éolienne, qui a une caractéristique spécifique définissant son potentiel à extraire l'énergie de l'air en mouvement. La courbe de puissance en forme de cloche des éoliennes nécessite la recherche du point de fonctionnement optimal, ce qui implique de maximiser la puissance (MPPT).

Afin d'assurer le fonctionnement dans ces conditions optimales, il est crucial de définir des lois de commandes appropriées. Ces lois de commandes permettent de réguler les paramètres de fonctionnement de la turbine éolienne en fonction des variations de la vitesse du vent. L'objectif est de maintenir la turbine éolienne au point de puissance maximale, même en présence de changements dans les conditions du vent.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'étudier l'optimisation de la chaîne de conversion éolienne en utilisant un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cet algorithme est conçu pour rechercher en continu le point de puissance maximale en ajustant les paramètres de contrôle de la turbine éolienne.

**Maximisation de puissance avec la connaissance de la courbe caractéristique**

L'utilisation d'un MPPT conventionnel simplifie la recherche du point de puissance maximale en exploitant la connaissance de la caractéristique de la voilure éolienne.

Cette approche nous permet d'atteindre rapidement l'optimum en utilisant des mesures simples effectuées à l'intérieur du convertisseur mécano-électrique [53].

La caractéristique d'une turbine tripale présente une forme en cloche, avec le sommet de cette courbe correspondant à la puissance maximale. Ce sommet est défini par la vitesse réduite optimale ( $\lambda_{opt}$ ) et le coefficient de puissance maximal ( $C_p^{opt}$ ).

La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation est égale à :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V_v} \tag{III.1}$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine est la suivante

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot S \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \tag{III.2}$$

Si l'on divise cette dernière expression par la vitesse de rotation, on obtient l'expression du couple :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \tag{III.3}$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$T_{t-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \tag{III.4}$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} \cdot C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \tag{III.5}$$

L'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilise la vitesse de rotation mesurée pour contrôler le couple et déterminer le couple de référence tel qu'illustré dans la figure (III.1) [54].

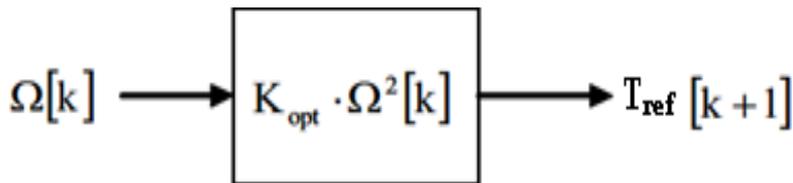


Figure III. 1. Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

Ce processus itératif permet de se rapprocher progressivement du point optimal, comme le montre la Figure (III.6) qui illustre visuellement cette méthode de recherche du point de puissance maximale.

1. En utilisant la mesure de la vitesse de rotation  $\Omega_t$ , le calcul du couple  $T_{mec-ref}$  est effectué. Ce couple est ensuite appliqué à l'arbre mécanique en ajustant la régulation du couple électromagnétique de la génératrice. L'équation de régulation est donnée par :

$$C_t - C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \tag{III.6}$$

2. Grâce à l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique (III.8) lors du pas de calcul suivant, atteignant ainsi la nouvelle vitesse  $\Omega_t$ ; où une nouvelle consigne de couple est calculée.

3. Après plusieurs itérations, on atteint l'optimum  $(T_{opt}; \Omega_{opt})$  correspondant à la puissance optimale  $P_{opt}(\lambda_{opt}, C_{p-opt})$ .

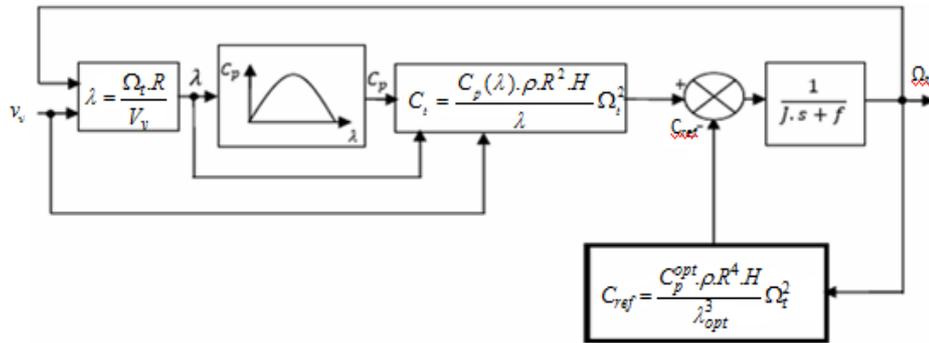


Figure III. 2. Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT [55].

### Commande de la chaîne de conversion éolienne

#### III.4.1 Commande vectorielle

La commande vectorielle vise à maintenir la tension continue à la sortie du redresseur en contrôlant les courants de référence. Ces courants de référence sont déterminés à partir de la régulation de la tension continue aux bornes du bus continu et sont fixés à zéro.

Il s'agit d'une commande vectorielle en couple qui maintient le courant d'axe d à zéro pour minimiser les pertes joules. Le courant d'axe q est ajusté en fonction de la régulation de la tension continue par rapport à sa référence. Les régulateurs à hystérésis sont utilisés pour la régulation des courants [56].

Indépendamment de l'objectif de la commande (régulation de la vitesse, du couple ou de la position), il est essentiel de contrôler le couple de manière instantanée. Cela peut être réalisé en ajustant les courants statoriques réels en modifiant leurs composantes directe et en quadrature.

L'expression du couple peut être exprimée de la manière suivante :

$$C_e = p(\Psi_d i_d - \Psi_q i_q) = p[(L_d - L_q) i_d + \Phi_f] i_q \tag{III.7}$$

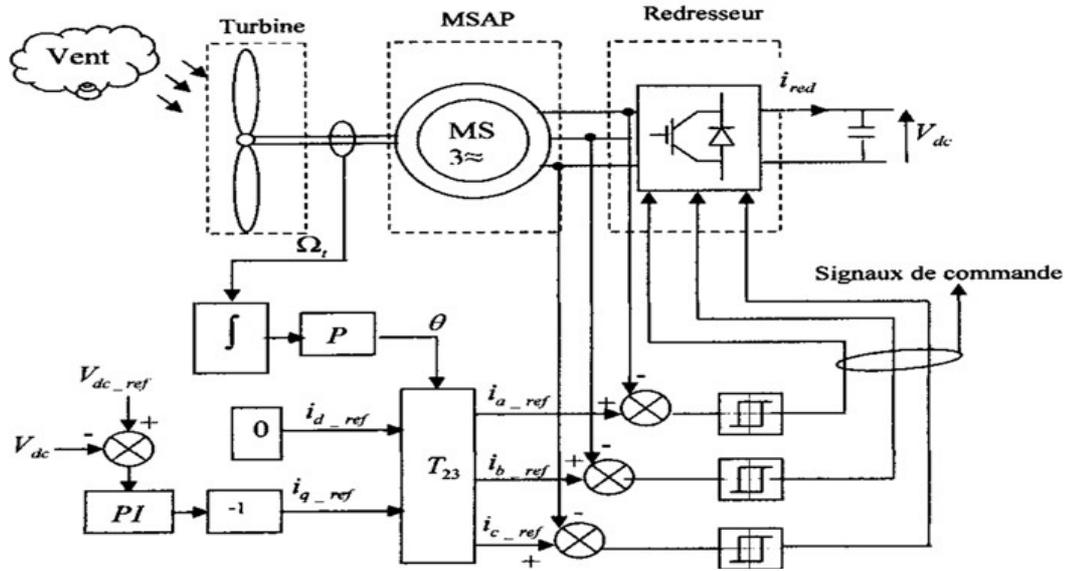


Figure III. 3. La représentation schématique du concept de commande vectorielle.

Lorsqu'il s'agit d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) avec un rotor lisse ( $L_{d'} = L_{q'}$ ), l'expression du couple peut être réécrite comme suit :

$$C_e = p\Phi_f i_q \tag{III.8}$$

Étant donné que le flux rotorique  $\Phi_f$  est constant, on observe que le couple ne dépend de la composante en quadrature du courant  $i_q$ . Il atteint son maximum, pour un courant donné, lorsque cette composante est maximale  $i_d = 0$ . Par conséquent, le déphasage entre les courants de phase et les f.é.m. (forces électromotrices) de la machine est nul, conformément à la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\Phi_f \end{bmatrix} \tag{III.9}$$

Le couple électromagnétique est directement proportionnel aux courants d'alimentation, similaire au fonctionnement d'une machine à courant continu à excitation séparée. De plus, la puissance absorbée est optimisée dans ce contexte  $i_d = 0$ .

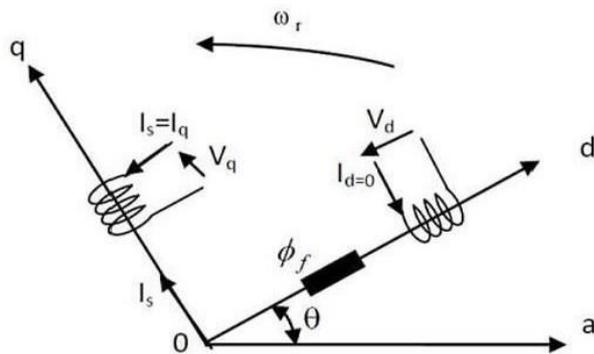


Figure III. 4. Principe de la commande vectorielle.

Gestion d'énergie

III.5.1 Principe de fonctionnement de l'algorithme de gestion

L'objectif principal de la stratégie de gestion est de garantir une alimentation continue et optimale de la charge en générant des références de puissance pour les différentes sources (éolien, batterie et pile à combustible). À cet effet, un algorithme a été proposé pour gérer les flux de puissance entre ces sources. Cet algorithme repose sur une règle logique "tout ou rien", qui détermine l'activation ou la désactivation des sources en fonction de l'évolution de l'état du système hybride .L'algorithme qui joue un rôle essentiel au cœur du système hybride, est illustré dans la figure (III.5).

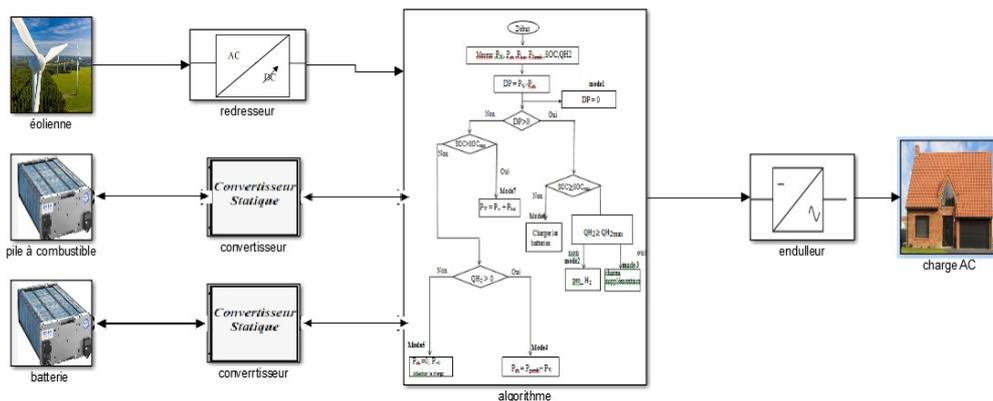


Figure III. 5. Schéma de principe de la stratégie de gestion.

Nous avons élaboré une stratégie de gestion privilégiant le système de conversion éolien en tant que source principale pour l'alimentation de la charge. La batterie et la pile à combustible sont utilisées à la fois comme sources d'énergie en cas de manque de production et comme systèmes de stockage en cas de surplus et si pour cela nous proposons sept modes de fonctionnement permettant

D'évaluer la capacité du système hybride à répondre à la puissance totale requise, en tenant compte des conditions atmosphériques.

**Mode 1 :**

$P_{éol} = P_{ch}$  : la charge sera alimentée directement par l'éolienne.

**Mode 2 :**

$DP > 0$ ,  $SOC > SOC_{max}$  et  $QH_2 > QH_{2Qmax}$  : la charge sera alimentée par l'éolienne et le surplus d'énergie alimente la charge supplémentaire.

**Mode 3 :**

$DP > 0$ ,  $SOC > SOC_{max}$  et  $QH_2 < QH_{2Qmax}$  : la charge sera alimentée par l'éolienne et le surplus sera utilisée pour produire l'hydrogène.

**Mode 4 :**

$DP > 0$ ,  $SOC < SOC_{max}$  : la charge sera alimentée par l'éolienne et le surplus est utilisée pour charger les batteries.

**Mode 5 :**

$DP < 0$ ,  $SOC > SOC_{min}$  : l'éolienne ne pourra pas alimenter la charge donc on appelle les batteries Pour compléter le déficit d'énergie.

**Mode 6 :**

$DP < 0$ ,  $SOC > SOC_{min}$  et  $QH_2 > 0$  : l'éolienne ne pourra pas alimenter la charge et les Batteries sont déchargées on appelle la pile à combustible pour compléter le déficit d'énergie.

**Mode 7 :**

$DP < 0$ ,  $SOC < SOC_{min}$  et  $QH_2 < 0$  : la charge sera détachée.

Le fonctionnement de cette stratégie de gestion est détaillé dans un algorithme représenté sous la forme d'un organigramme illustré dans la figure (III.6).

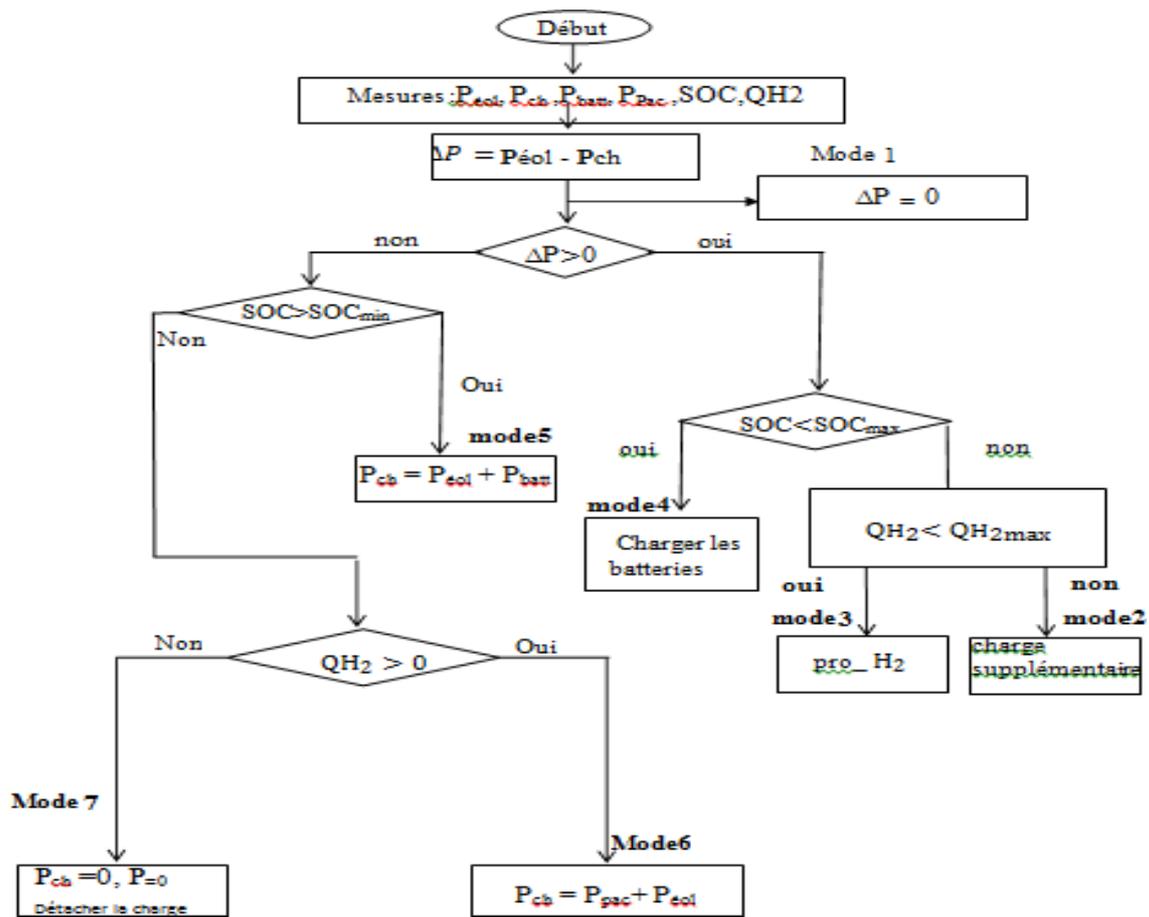


Figure III. 6. Organigramme de la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien.

Avec :

$P_{éol}$ : La puissance éolienne.

$P_{ch}$ : La puissance demandée par la charge.

SOC : L'état de la charge et de la décharge de batterie (State of charge).

$\Delta P$  : La différence entre la puissance éolienne et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante:

$$\Delta P = P_{éol} - P_{ch} \tag{III.10}$$

L'organigramme de la stratégie de gestion présente les différentes situations auxquelles le système hybride pourrait être confronté. Selon la situation, l'algorithme décide d'activer ou de désactiver la source d'énergie du système. Si une surproduction d'énergie se produit, l'algorithme ordonne la recharge de la batterie. Tout excès de puissance éventuel sera dissipé en utilisant la charge auxiliaire.

Simulation et interprétation

Dans cette partie on va présenter les résultats de la simulation de deux journées différentes de notre système hybride qui est constitué d'une éolienne pile à combustible et batterie de stockage à l'aide de « Matlab/Simulink »

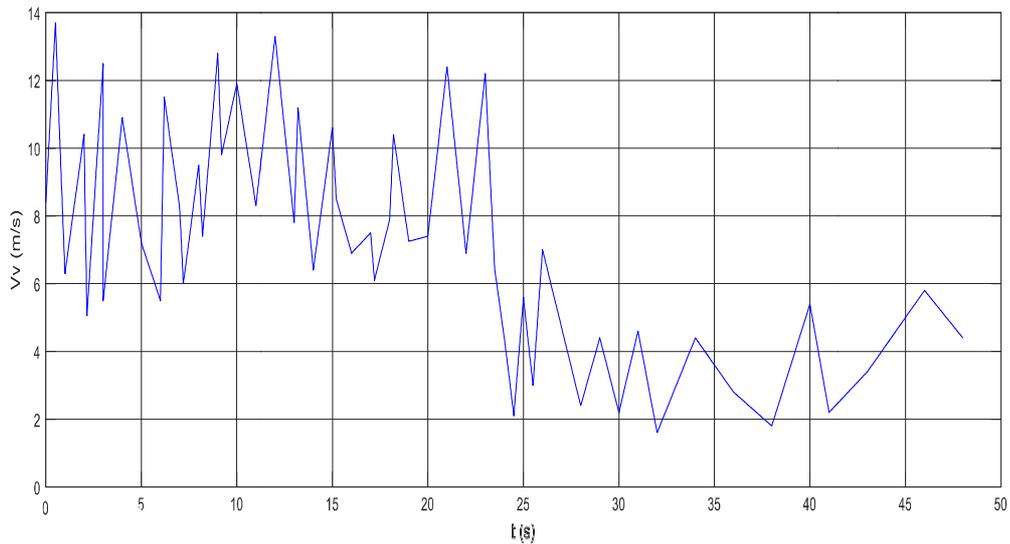


Figure III. 7. Vitesse du vent en fonction de temps.

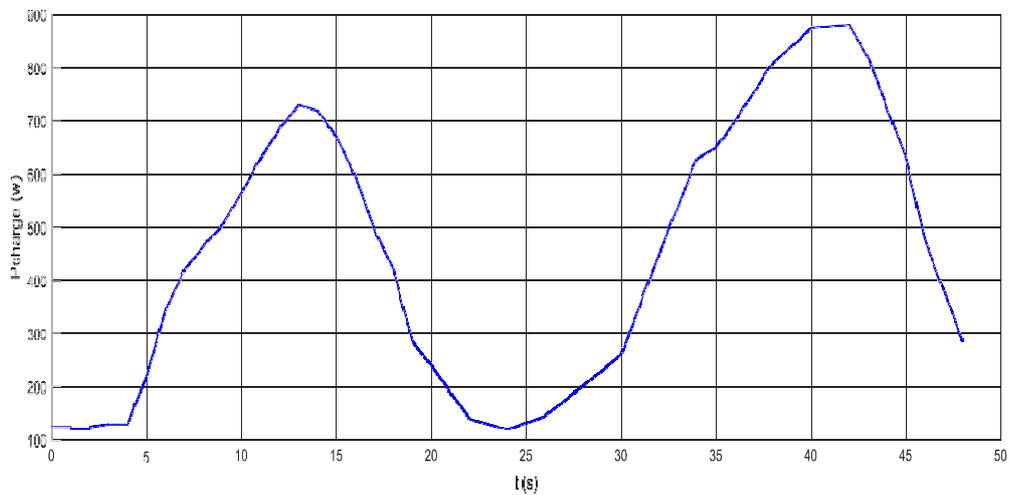


Figure III. 8. La puissance demandée par la charge

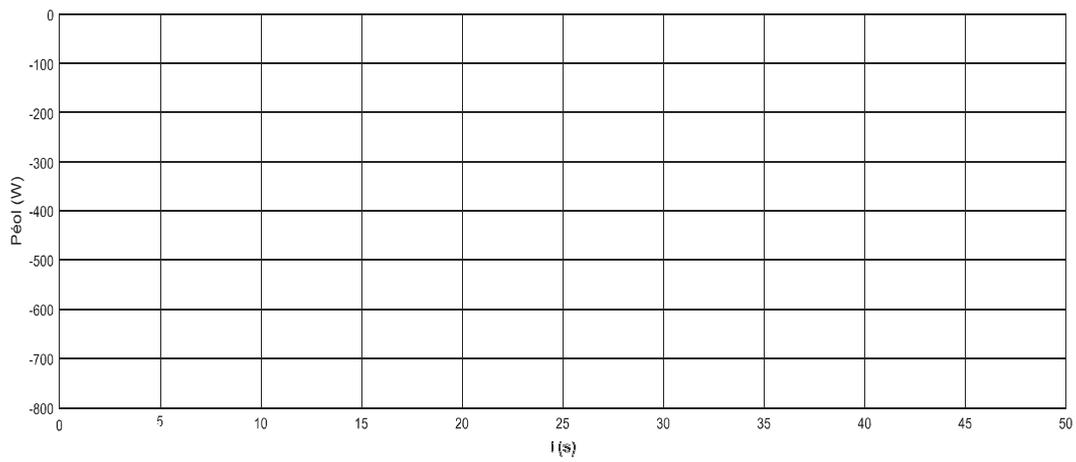


Figure III. 9. La puissance produite par l'éolienne.

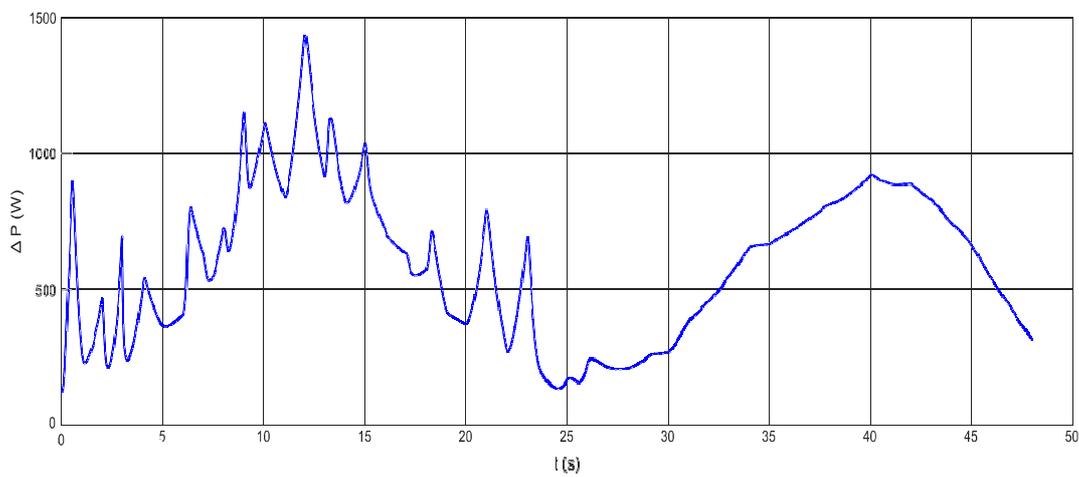


Figure III. 10. La différence entre la puissance de l'éolienne et la puissance de charge  $\Delta P$ .

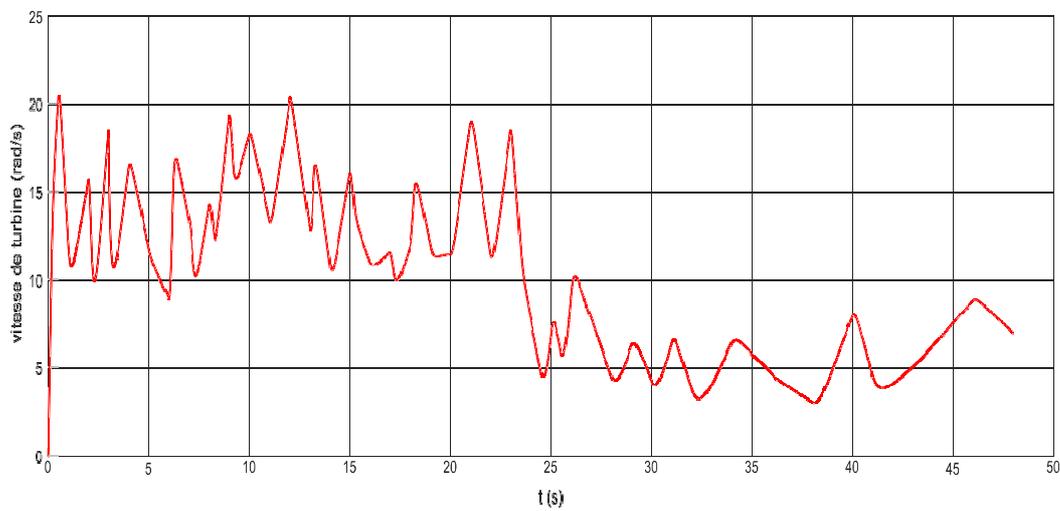


Figure III. 11. La vitesse de turbine.

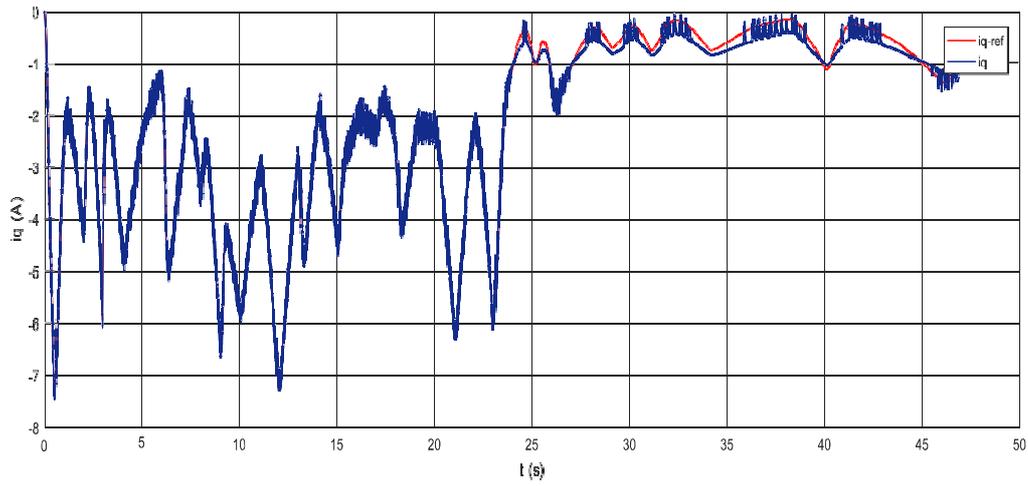


Figure III. 12. Le courant  $I_q$ .

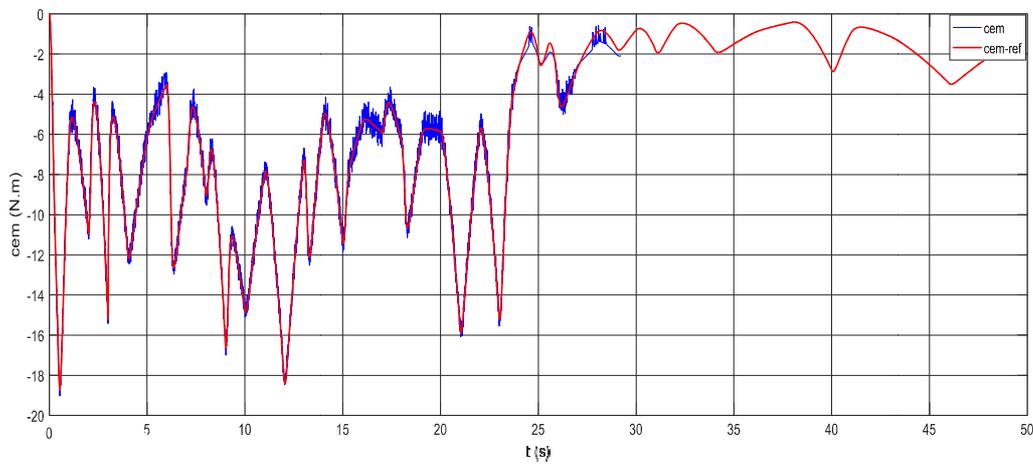


Figure III. 13. Le couple électromagnétique

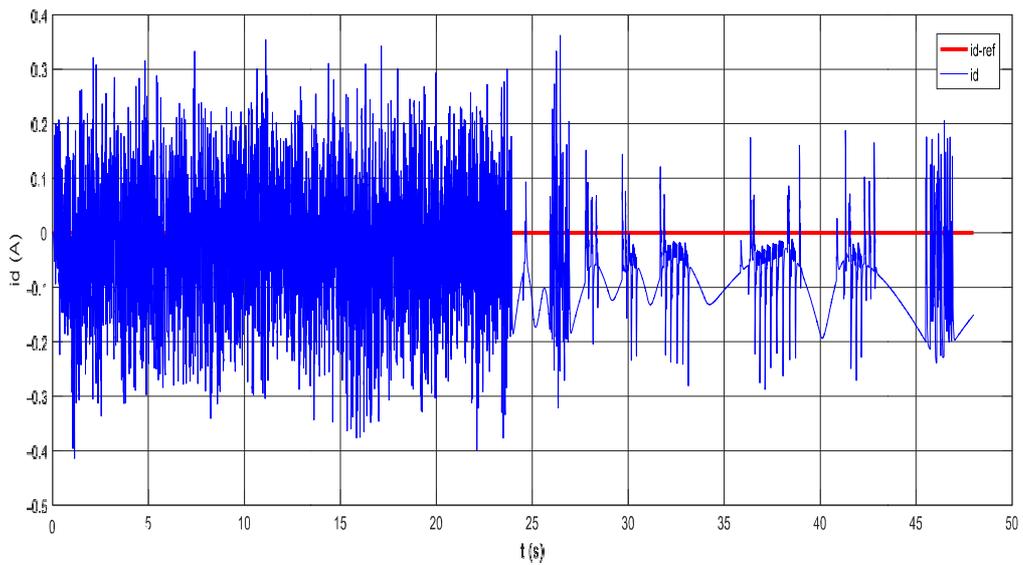


Figure III. 12. le courant  $I_d$ .

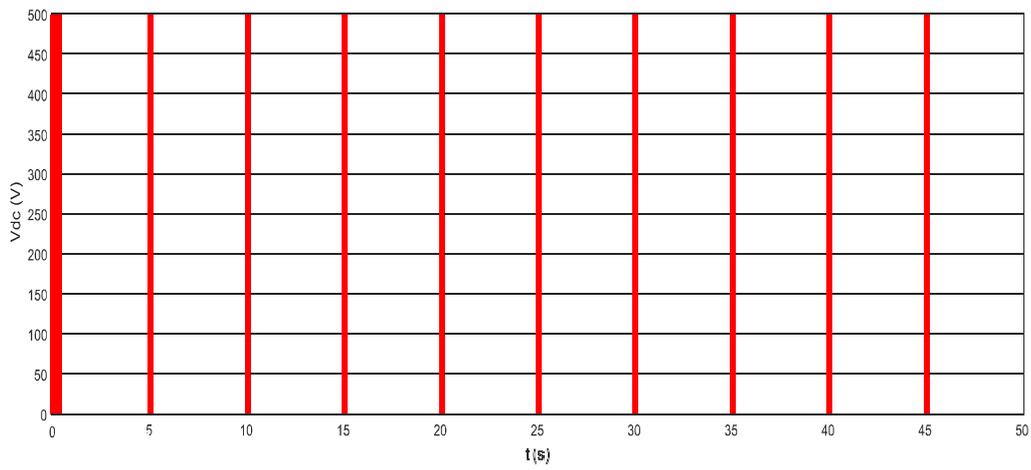


Figure III. 13. La tension de bus continue.

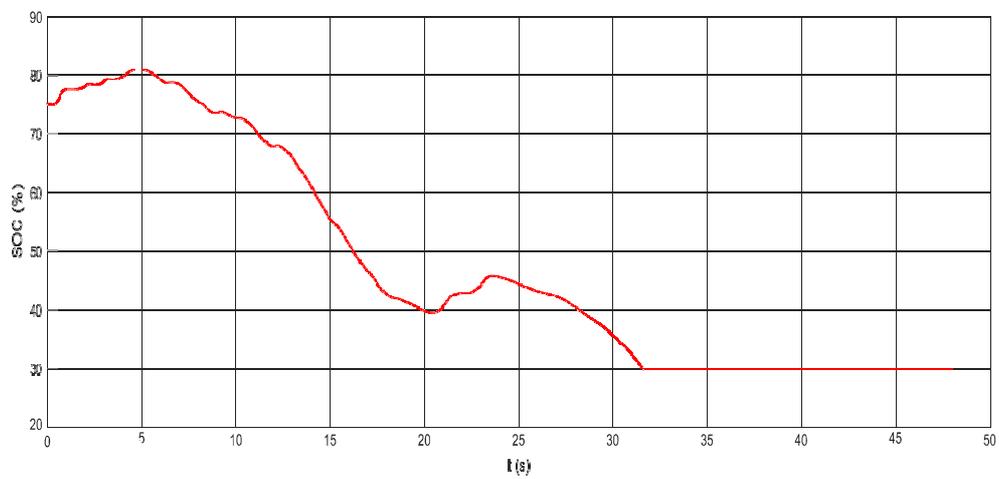


Figure III. 14. L'état de charge de la batterie.

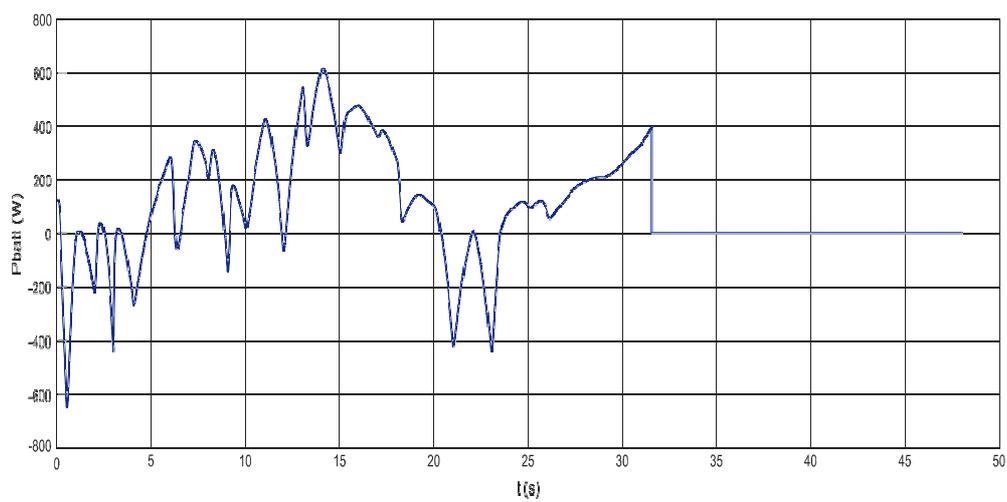


Figure III. 15. La Puissance de la batterie.

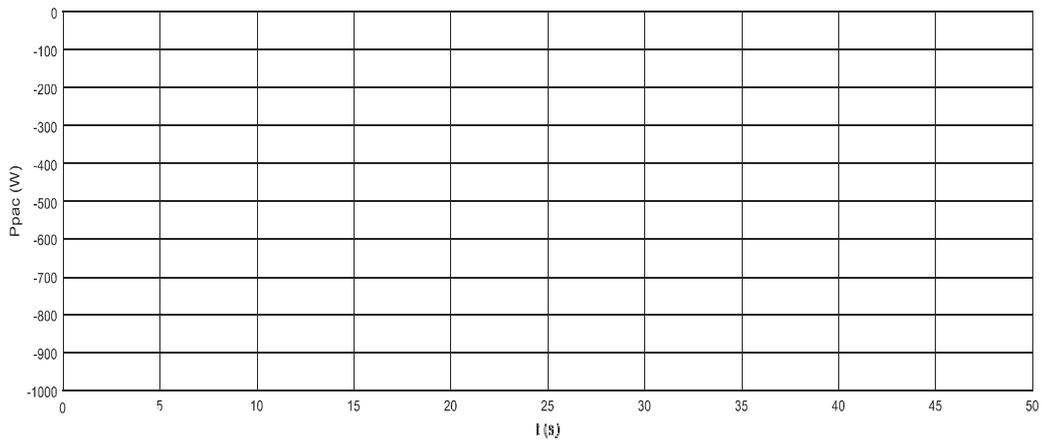


Figure III. 16. Puissance de la pile à combustible.

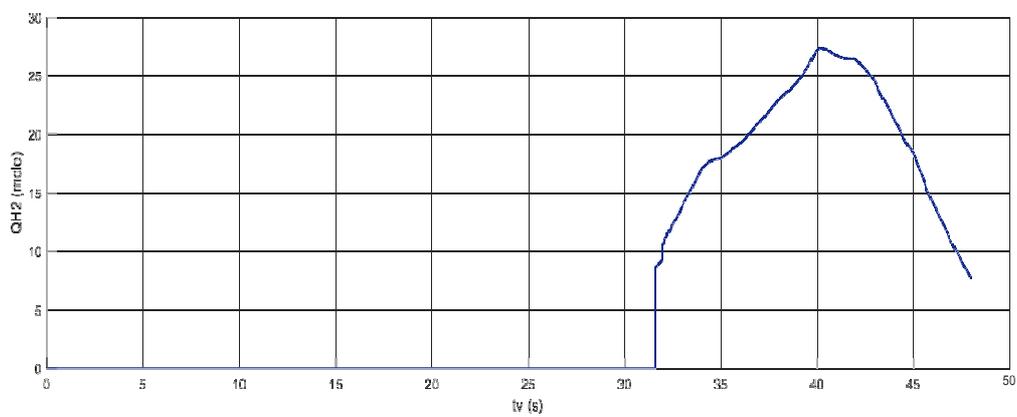


Figure III. 17. Quantité d'hydrogène requise.

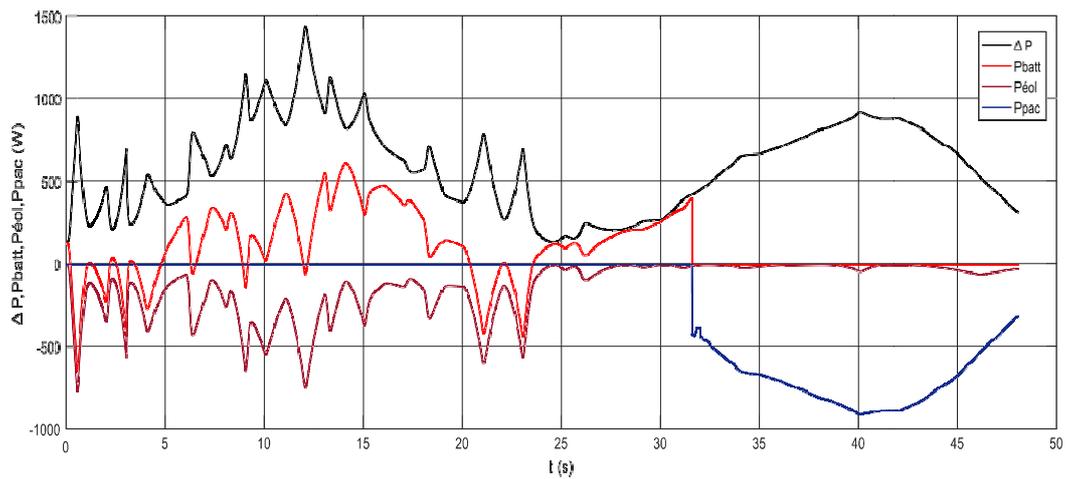


Figure III. 18. Les puissances de système hybride.

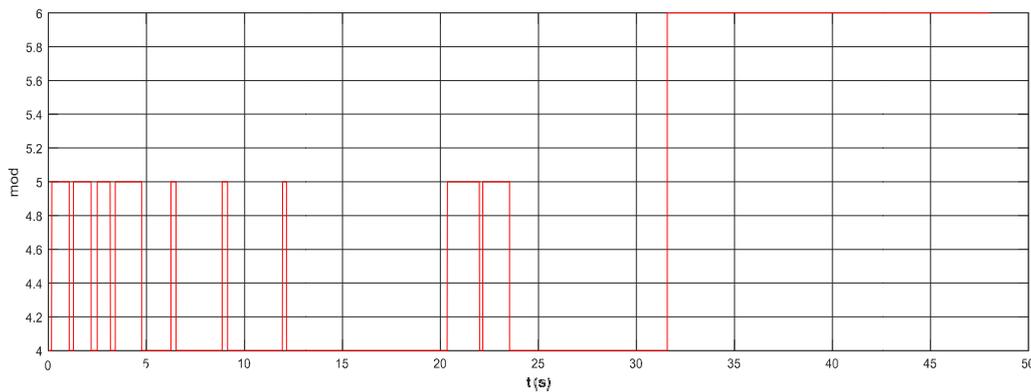


Figure III. 19. Mode de fonctionnement.

### l'interprétation des résultats

Les résultats de la simulation sont obtenus en tenant compte des variations climatiques tout au long de deux journées différentes :

- ✓ Figure III.7 : cette figure illustre une variation de vent durant deux jours.
- ✓ Figure III.8 : cette figure montre une puissance demandée par une charge durant deux journées.
- ✓ Une variation de la puissance maximale produite par l'éolienne à l'aide d'une commande « MPPT » et que cette puissance est proportionnelle à la variation de la vitesse du vent comme elle représente la Figure III.9.
- ✓ La figure III.10 montre la différence entre la puissance demandée par la charge et la puissance produite par l'éolienne.
- ✓ on remarque dans la figure III.11 que la vitesse de la turbine a une relation directe avec la vitesse du vent ce qui veut dire que l'augmentation ou la diminution de la vitesse dépend du vent.
- ✓ D'après la figure III.12 on remarque que le courant  $I_q$  présente une forme similaire à celle du couple électromagnétique, ce qui confirme la validité du principe de la commande vectorielle.
- ✓ Figure III.13: on a allure du couple électromagnétique c'est l'image du courant  $I_q$ , ce qui confirme le principe de la commande vectorielle.
- ✓ La Figure III.14 illustre le courant  $I_q$  montre la trajectoire du courant le long de l'axe directe  $I_d$ .
- ✓ On remarque que la tension de « bus-continu » reste constante quelque soit la variation négligeable qui sont à cause de la demande énergétique de la charge comme elle est présentée sur la figure III.15.
- ✓ Nous observons sur la figure III.16 une variation de l'état de charge de la batterie entre 30% et

80%, pour éviter une décharge et surcharge de la batterie.

- ✓ D'après la figure III.17 nous observons que la puissance de la batterie est proportionnelle au courant qui varié avec le besoin énergétique.
- ✓ La figure III.18 illustre la puissance générée par la pile à combustible lorsque la production d'énergie de l'éolienne et de la batterie est insuffisante
- ✓ La figure III.19 représente la quantité d'hydrogène nécessaire produite par le catalyseur pour répondre à la demande de puissance lorsque la pile à combustible génère de l'énergie en cas de déficit.
- ✓ la figure III.20 illustre l'échange des flux d'énergies entre les différentes parties de notre système hybride.
- ✓ D'après la figure III.21 on constate que les modes de fonctionnement varient en fonction des fluctuations des conditions climatiques, grâce à l'utilisation d'un algorithme de gestion d'énergie hautement fiable qui garantit une alimentation ininterrompue de la charge.

### **Conclusion**

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté a la génératrice éolien présente une caractéristique non linéaire, ce qui nécessite l'utilisation d'un contrôleur MPPT pour maximiser sa production d'énergie. De plus, la commande vectorielle est appliqué avec la génératrice à aimant permanent afin d'ajuster des paramètres de fonctionnement en gardant la tension de bus-continue fixe quel que soit les variations de vent.

En ce qui concerne la gestion de notre système, celle-ci repose sur un algorithme qui prend en compte plusieurs modes de fonctionnement représentant les différentes situations aux quelles le système hybride peut être confronté.

Les résultats de simulation effectuée ont démontré l'efficacité de chaque composant du système hybride dans la conversion et le stockage de l'énergie éolienne ce qui a met en évidence les avantages et le potentiel des systèmes de conversion d'énergie hybrides, qui combinent différentes technologies pour maximiser la production d'énergie renouvelable de manière efficace et fiable.

## Conclusion générale

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est l'étude et gestion d'un système hybride autonome constitué d'une « éolienne-pile à combustible-batterie » et de proposer une méthode de gestion optimale pour répondre aux exigences des systèmes d'alimentation.

Nous avons exploré dans le premier chapitre les principes fondamentaux, les avantages, les inconvénients, les types de chaque composant du système hybride ainsi les principes de fonctionnement qui consiste à combiner plusieurs sources d'énergie, Dans notre cas il est constitué d'une éolienne, d'une pile à combustible et d'une batterie.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des descriptions détaillées des modèles de chaque composant. Ces modèles sont principalement basés sur des relations mathématiques qui définissent avec précision le comportement des composants dans les sous-systèmes intégrés dans notre système hybride. Après l'analyse de cette modélisation Nous avons constaté que les caractéristiques des différents générateurs (éolien, pile à combustible, batterie) présentent une forte non linéarité.

D'après le troisième chapitre nous avons observé une caractéristique non linéaire dans le générateur éolien, ce qui rend nécessaire l'utilisation d'un contrôleur MPPT pour maximiser la production d'énergie. De plus, nous utilisons une commande vectorielle avec la génératrice à aimant permanent du générateur éolien afin d'optimiser ses performances. Cette approche nous permet d'ajuster les paramètres de fonctionnement et de maintenir la tension du bus continu constante, indépendamment des variations du vent.

Pour évaluer les performances du système hybride, des simulations ont été réalisées pour chaque composant de la chaîne de conversion éolienne, y compris les batteries et la pile à combustible. Les résultats de ces simulations ont montré l'efficacité de chaque élément du système hybride dans la conversion et le stockage de l'énergie éolienne. Ces résultats démontrent les avantages et le potentiel des systèmes de conversion d'énergie hybrides, qui combinent différentes technologies pour maximiser la production d'énergie renouvelable de manière efficace et fiable ; Par conséquent, l'équilibre du flux énergétique entre les différentes sources d'énergie et la demande de la charge est maintenu.

Concernant la gestion nous avons intégré un algorithme dans notre étude pour déterminer les points de fonctionnement des sources d'énergie du système hybride. Cet algorithme vise à produire la puissance demandée par la charge en utilisant en priorité les sources d'énergie renouvelable, contribuant ainsi à une gestion optimale de l'énergie dans le système. Afin de valider cette stratégie de gestion, nous avons pris en compte plusieurs modes de fonctionnement représentant les

situations auxquelles le système hybride peut être confronté. Ensuite, nous avons analysé et expliqué les résultats des différentes hypothèses simulées à l'aide de Matlab/Simulink.

La production d'électricité par le système hybride, qui combine une source éolienne avec une pile à combustible et un système de stockage, offre une solution pertinente pour répondre aux défis posés par le contexte énergétique, et l'amélioration de rendement des systèmes autonomes éolienne/pile à combustible recommandent l'installation de ces systèmes dans des sites bénéficiant d'une exposition optimale du vent.

Pour améliorer l'efficacité de notre système hybride, nous envisageons l'utilisation de :

- super-condensateurs pour le stockage de l'énergie en cas de surplus car ils ont une capacité de charge et de décharge rapide, ce qui les rend idéaux pour compenser les fluctuations de production d'énergie et assurer une utilisation optimale de celle-ci.
- l'intégration d'une technologie d'optimisation de point de puissance maximale (MPPT) intelligente. Cette technique permettra de maximiser la production d'énergie en ajustant automatiquement les paramètres du système pour suivre les variations des conditions environnementales et tirer le meilleur parti de la source d'énergie disponible, que ce soit l'énergie éolienne ou toute autre source d'énergie renouvelable.

## Référence Bibliographique

- [1] M. TIAR, « Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2017.
- [2] M. SADAOUI, M. MEDDOURI, « Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque-Eolien) », Mémoire de Master, électrotechnique, Université Bejaia, Algérie, 2012.
- [3] E. IAN BARING-GOUL, L. FLOWERS, P. LUNDSAGER « World wide status of wind-diesel application » Pre-work shop Wind-diesel, Anchoray, Alaska, 2004.
- [4] S. AIT MAHREZ B.ADJEROUD, « Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC stockage d'hydrogène », mémoire de master, Université saadDahleb, Blida, 1 septembre 2020.
- [5] M. ASHARI, C. V. NAYAR « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system » Renewable energy, Vol.66, No.1, PP.1-9, Elviesier Science 1999.
- [6] Z. Roumila « Commande d'un système d'énergie hybride (Photovoltaïque - éolien- diesel) », mémoire de magister de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [7] D.CYLIA, K. OUAZNA « Etude, gestion et optimisation d'un système hybride (éolienne, pile à combustible avec stockage) », Mémoire de Master en Electronique des systèmes embarqués, Université Akli Mouhend Oulhadj, bouira, Algérie, 2022.
- [8] M.L. ELHAFYANI, S. ZOUGGAR, A.AZIZ, M.BENKADDOUR, « Conception et modélisation d'un système éolien contrôlé par un régulateur de tension », Colloque International sur les Energies Renouvelable CER, Oujda, Maroc, pp. 1-5, 4-5, 2007.
- [9] A. TAZMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2015.
- [10] N. LA VERDURE, D. ROYE, S. BACHA, R. BELHOMME, « Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques », la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [11] T. ABDEREZZAK et S. MILOUD « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent », Mémoire de Master en électrotechnique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, Algérie, 2019.

- [12] N. MEKKAOUI, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée ». Mémoire Magister, Université Batna2, 2004.
- [13] L.KHATTACHE, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentée », Mémoire Magister, Batna, 2007.
- [14] J. CHEN, C. NAYAR, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, vol 1, pp. 387-394 , 1998 .
- [15] S. El AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL) Spécialité : Génie électrique - Electronique - Automatique, 06 décembre 2004.
- [16] R. MICHAUX, P. LETELLIER, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, (N°3), pp.37-42, mars 1997.
- [17] N. ZIDANE, « Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Énergies Renouvelables », Mémoire Magister, université farhatabbas, setif ,2014.
- [18] Z. ZHANG, « Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible », thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne,2010.
- [19] E.M.NATSHEH, « Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial Intelligence » Thèse Doctorat, Université Manchester Métropolitain, France, July 2013.
- [20] Fuel cell handbook (seventh edition). Technical report,U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy - National Energy Technology Laboratory, Nov. 2004.
- [21] SR-12 Modular PEM Generator Operator's Manual, Last Revised 7/2000; Revision 0000, Avista Laboratories, Spokane, WA, July 2000.
- [22] I. SADLI, « modélisation par impédance d'une pile a combustible pem pour utilisation en électronique de puissance », Thèse de Doctorat, Ingénieur de l'université de Bejaia, Algérie, (7 décembre 2006).
- [23] A. BENMOUNA, « Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées », Thèse de Doctorat, université Bourgogne franch\_comte, (5 october 2019).

- [24] S. PATRICE, « le stockage électrochimique de l'énergie : principes, applications et futurs défis », Thèse de Doctorat, France, 07avril 2015.
- [25] P.THOUNTHONG, « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super-condensateurs », Thèse Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005.
- [26] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/stockage-de-l-energie-electrique> , consulté le 22 juin 2023.
- [27] I. VECHIU,«Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome»,Thèse de doctorat,Université du Havre,France,2005.
- [28] C. Wang, M. HASHEM NEHRIR, S.R. shaw« Dynamic Models and Model Validation for PEM Full Cells Using Electrical Circuits », IEEE Transactions on Energy Conversion, Juin 2005.
- [29] H. Mustapha, « Contribution à l'étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque/Pile à combustible », Thèse Doctorat Es Science, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (Mohamed Boudiaf), Algérie, juillet 2010.
- [30] D. HARTWANGER, A. HORVAT, « 3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD », NAFEMS UK conference 2008, Engineering Simulation: Effective Use and Best Practice, Cheltenham, UK, June10-11,2008.
- [31] A.N. GORBAN, A.M GORLOV, V.M, SILANTYEV, « Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow », Journal of Energy Resources Technology, Volume (123), Issue 4, pp. 311-317, Décembre 2001.
- [32] A. MAMADIE SYLIA, « Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation », mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières, Canada, Hiver 2013.
- [33] T. ABDOULKARIME, « Gestion D'un Système Autonome Hybride Photovoltaïque Eolien Pour Applications Agricoles », mémoire présente à l'Université du Québec à Trois Rivières, Canada, juillet 2016.
- [34] S. LALOUNI, « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride », thèse doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2009.
- [35] K. IDJDARENE, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse en cotutelle entre l'Université de Bejaia, Algérie et l'Université Lille 1, France, 2010.

- [36] T. REKIOUA, « contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », Doctorat de l'I.N.P.L, Institut national de polytechnique, lorraine ,1991.
- [37]N. TLILI, B.NEILY AND F. B. SALEM, « Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a Photovoltaic Generator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part I) », IEEE11thInternational Multi-Conferenceon Systems, Signals & Devices (SSD14).2014.
- [38] SH. SINGH, P. CHAUHAN, M. A. AFTAB, I. ALI, S. M. SUHAILHUSSAIN, T.S.USTUN, «Cost Optimization of a Stand-Alone Hybrid Energy System with Fuel Cell and PV », Energies 2020, 13(5), 1295.
- [39] PHATIPHAT THOUNTHONG, «Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super condensateurs », thèse doctorat de l'INPL. L'Institut National Polytechnique, Lorraine, 2005.
- [40]J.C. AMPHLETT, R.M. BAUMERT, R.F. MANN, B.A. PEPPLEY, P.R. ROBERGE, A. RODRIGUES, « Parametric modelling of the performance of a 5-kW protonexchange membrane fuel cell stack», Journal of Power Sources, Vol.(49), 1-3, 349-356, 1994.
- [41] M. HATTI, « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque/Pile à Combustible », Thèse Doctorat Es Science, Université des Sciences et de la Technologie,d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2010.
- [42] H. YASUHITO, K.KOJI, « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for OperationalStrategy in Residential Use »,47th International Universities Power Engineering Bibliographie Page | 50 Conference (UPEC),2012.
- [43] J. PADULLES, G.W. AULT AND J.R. MCDONALD, «An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation», Journal of Power Sources, Vol 86,( N°1), pp. 495 - 500, 2000 .
- [44] M.UZUNOGLU, M.S. ALAM, «Dynamic, Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, (N°3), pp. 767 - 775, 2006.
- [45] ULLEBERG, ØYSTEIN, « Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach », International journal of hydrogen energy, 28.1 : 21-33. (2003).
- [46] A.KHALILNEJAD, «A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer» Energy Conversion and Management, Vol 80, Pages 398-406, April 2014.

- [47] H. YASUHITO, KOJI, «Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for Operational Strategy in Residential Use », 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) ,2012.
- [48] R. KUMAR PACHAURI, YOGESH K. CHAUHAN, «Hydrogen generation/pressure enhancement using FC and ANN based MPPT assisted PV system »,IEEE Electrical Engineering Department, School of Engineering, Gautam Buddha University, Greater Noida, India ,28-29, November 2014.
- [49] M. FRADJ, K. MECHERI K, «Etude et gestion d'un système hybride »Mémoire de master, Université de kasdi merbah, ouargla, 2019.
- [50] S.BENSMAIL, «Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïque», Mémoire de magister Université d'a.mira-bejaia, 2012.
- [51] A. MIRECKI « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [52] E.M.NATSHEH « Hybrid Power SystemsEnergy Management Based on Artificial Intelligence » Thèse Doctorat, Université Manchester Métropolitain, France, July 2013.
- [53] S. LALOUNI, « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université a.mira Bejaia, Algérie, 2009.
- [54] R. RIYADH, «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée», Thèse de doctorat, option : Commande Electrique, univ de Batna 2, Algérie, 2016.
- [55] T. REKIOUA « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, France, 1991.
- [56] R. RUAS « Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque », thèse doctorat en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.