

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 -

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

المرجع: ...../م/م / 2022

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Référence : ..... /MM /2022

## Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité: Electronique des systèmes embarqués

Réalisé par :

**Dellys Cylia**

Et

**Kebaili Ouazna**

## Thème

**Etude, gestion et optimisation d'un système  
hybride (éolienne, pile à combustible avec stockage)**

Soutenu le: **08/09/2022**

Devant la commission composée de :

Mr : GRICHE ISSAM

M.C.B

Univ. Bouira

Président

Mr : MAAFA AMAR

M.C.B

Univ. Bouira

Examineur

Mme : BENMAIL SAMIA

M.C.B

Univ. Bouira

Rapporteur

## *Dédicaces 1*

*Grâce à DIEU tout - puissant, je dédie ce modeste travail à  
A mes très chers parents Mon cher père **Arezki** et ma chère mère **Djamila**  
Tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice,  
patience*

*ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.*

*À mes chers frères **Zinedine** et **Bilal** et ma chère sœur **Nawel** pour les  
efforts et l'attachement qu'ils m'ont fournis pour me supporter.*

*À mon cher mari **Aouam** et toute la famille **Zioui***

*À mes grands - parents pour leur patience a fait de moi ce que je suis  
maintenant*

*que DIEU me les garde incha'allah.*

*À mes chères tante **Nadia** et **Nacira***

*À ma chère binôme **Cylia** et sa famille*

*Merci à vous, avec qui j'ai partagé tous les moments de joie et a qui je*

*Souhaite le succès et la réussite*

*À toute la promotion d'électronique des systèmes embarqués 2022*

*À tous ceux que j'aime.*

***Kebaili Ouazna***



## *Dédicaces2*

*Je dédie ce travail à ma très chère mère (**Chafia**) et à mon cher père (**Mahmoud**) qui ont été toujours à mes côtés dans les moments difficiles, qui m'ont tout appris, tant donné sans rien demandé en retour,*

*Que Dieux vous gardent pour nous chers parents.*

*À mes très chers frères (**Soufiane, Salah, Toufik, Salem**) et ma sœurs (**Souhila**) qui ont toujours été présents dans les bons moments comme dans les durs, Dieux vous garde pour moi.*

*À mon cher mari (**Hassan**) qui a été la source de ma force, qui m'a encouragé à continuer le chemin, merci d'être à mes côtés.*

*À ma fille (**Iline**) qui à illuminé ma vie.*

*À toute ma famille ( **Dellys**) et la famille (**Zaidi**)*

*Dellys Cylia*



## *Remerciements*

*Le plus grand merci revient à Dieux qui lui seul nous a guidé, dans le bon sens durant notre vie et nous a aidé à réaliser ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont à notre encadreur Mme **BENSMAIL Samia** pour la confiance qu'elle nous a témoignée les précieux conseils prodigues ainsi que le suivi constant tout au long de la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous la remercions également de nous avoir fait profiter de ses connaissances et tout son aide.*

*Nos remerciements à toutes nos familles pour leurs soutient, nos Parents, Frères et sœurs pour leurs encouragements durant tout notre parcours Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions, ainsi que tous les enseignants de département de génie électrique.*



## Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables pour la production de l'énergie est une option énergétique prometteuse qui répond de la demande croissante en énergie dans le monde, mais vue leurs nature stochastique n'assure pas une alimentation continue. L'association de plusieurs type de sources renouvelables (éolienne, pile a combustible, batteries) avec des batteries de stockage parait la solution idéal Pour résoudre ce problème. Dans ce travail deux aspects sont traités à savoir : le choix de la configuration la plus adaptée, la maximisation de l'utilisation d'une ressource renouvelable. Dans ce contexte une modélisation et simulation de différents éléments de système hybride sont présentées. Pour maximiser l'utilisation d'une ressource renouvelable un algorithme MPPT classique est introduit en vue d'obtenir un rendement énergétique maximal. La gestion d'énergie des différentes sources (éolienne) est assurée par un superviseur.

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

## **Table des matières**

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des Matières .....	III
Liste des figures et les tableaux .....	IV
Listes des acronymes et symboles.....	V

### ***Introduction Générale***

#### ***Chapitre I Généralités sur le système hybride***

I.1.Introduction.....	3
I.2.L'énergies renouvelable.....	3
I.2.1.Définition .....	3
I.3.L'énergie éolienne .....	4
I.3.1.Définition.....	4
I.3.2.Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	4
I.3.3.Les types d'éoliennes .....	5
I.3.3.1.Eoliennes à axe vertical.....	5
I.3.3.2.Eoliennes à axe horizontal.....	6
I.3.4.Les composants d'une éolienne .....	6
I.4.La piles à combustible .....	7
I.4.1.Définition .....	7
I.4.2.Les types de pile à combustible.....	8
I.4.3.Principe de fonctionnement d'une pile à combustible .....	8
I.4.4.Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM.....	9
I.5.Batteries de stockage .....	9
I.5.1.Définition .....	9
I.5.2.Les types de batteries .....	10
I.6.Systèmes hybrides .....	10

## *Table des Matières*

---

I.6.1.Définition.....	10
I.6.2.Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	11
I.7.Conclusion.....	12

### ***Chapitre II Modélisation des différents composants du système hybride***

II.1.Introduction.....	13
II.2.Structure d'un système électrique hybride.....	13
II.3.Modélisation de la chaine de production éolienne.....	14
II.3.1.Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz).....	14
II.3.2.Fonctionnement optimal d'une éolienne .....	17
II.3.3.Modélisation de la vitesse du vent.....	18
II.3.4.Modélisation de la turbine éolienne .....	19
II.3.5.Le multiplicateur de vitesse.....	20
II.3.6.Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	20
II.3.6.1.Equations électriques et magnétiques de la machine.....	21
II.4.Modélisation des convertisseurs .....	23
II.5.Modélisation du bus continu .....	23
II.6.Modélisation de la pile à combustible PEMFC.....	24
II.6.1.Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC .....	24
II.6.1.1.La tension de Nernst.....	25
II.6.1.2.La chute de tension d'activation.....	26
II.6.1.3.La chute de tension ohmique.....	27
II.6.1.4.La chute de tension concentration.....	27
II.6.2.Taux d'hydrogène consommé.....	28
II.7.Modélisation du hacheur boost ( élévateur).....	29
II.8.Modélisation de la batterie.....	30
II.9.Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage.....	31
II.10.Conclusion.....	31

# *Table des Matières*

---

## **Chapitre III**                    **Optimisation et Simulation du système hybride**

III.1.Introduction.....	32
III.2.Le système de conversion d'énergie éolienne.....	32
III.2.1.Maximisation de la puissance MPPT.....	32
III.2.2.La commande vectorielle.....	34
III.2.3.Commande de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	35
III.2.4.Simulation du fonctionnement de générateur éolien avec l'algorithme MPPT classique(OTC).....	36
III.3.La Pile à combustible PEMFC.....	39
III.3.1.Simulation de la pile à combustible.....	39
III.3.2.Les commentaires sur les graphes de la simulation de la pile à combustible.....	41
III.4.Conclusion.....	42

## **Chapitre IV**                    **Le système global et le gestion d'énergie**

IV.1.Introduction.....	43
IV.2.Gestion d'énergie.....	43
IV.2.1.Stratégies de gestion du système hybride.....	43
IV.2.2.Principe de fonctionnement de l'algorithme de gestion.....	44
IV.2.3.Résultats de simulation et discussions.....	46
IV.3.Simulation et résultats numériques.....	46
IV.3.1.Interprétation des résultats.....	51
IV.4.Conclusion.....	52

## **Conclusion Générale**

## **Références**

## **Annexe**



**Liste des figures**

Figure I.1 Les énergies renouvelables.....	3
Figure I.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	5
Figure I.3 Eolienne à axe vertical.....	5
Figure I.4 Eolienne à axe horizontal.....	6
Figure I.5 Clarification d'une pile à combustible.....	6
Figure I.6 Différentes parties d'une éolienne.....	8
Figure I.7 principe de fonctionnement de la pile à combustible à électrolyteacide (A) ou alcalin (B).....	9
Figure I.8 Cellule électrochimique de base.....	10
Figure I.9 Schéma synoptique du système d'énergie hybride.....	11
Figure II.1 Structure générale d'un exemple de système électrique hybride.....	13
Figure II.2 Tube de courant autour d'une éolienne.....	15
Figure II.3 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....	18
Figure II.4 Caractéristique $C_p(\lambda)$ .....	19
Figure II.5 Représentation symbolique de la MSAP.....	21
Figure II.6 Schéma du redresseur MLI.....	23
Figure II.7 Le bus continu $V_{dc}$ .....	24
Figure II.8 Le Schéma équivalent d'une PEMFC.....	25
Figure II.9 Schéma de hacheur type boost.....	29
Figure II.10 Modèle R-C de la batterie.....	30
Figure II.11 Schéma d'un hacheur Buck-Boost.....	31
Figure III.1 Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.....	33
Figure III.2 Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.....	34
Figure III.3 Principe de la commande vectorielle.....	35
Figure III.4 Schéma bloc de la commande appliquée au système de conversion éolien.....	36

## *Liste des figures et des tableau*

---

Figure III.5 Allure de la vitesse du vent.....	37
Figure III.6 Allure de la vitesse de la turbine.....	37
Figure III.7 Allure de puissance de la turbine.....	37
Figure III.8 Allure du coefficient de puissance $C_p$ .....	38
Figure III.9 Allure du couple électromagnétique de référence et du couple mesuré.....	38
Figure III.10 Allure du courant $i_q$ mesuré avec sa référence.....	38
Figure III.11 Allure du courant $i_d$ mesuré avec sa référence.....	39
Figure III.12 La tension de la pile à combustible.....	39
Figure III.13 Le courant de la pile à combustible.....	40
Figure III.14 la puissance de la pile à combustible.....	40
Figure III.15 La puissance de générateur avec la puissance de charge.....	40
Figure III.16 La tension du bus continu.....	41
Figure IV.1 Schéma de principe de la stratégie de gestion.....	43
Figure IV.2 Organigramme de la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien.....	45
Figure IV.3 Vitesse du vent.....	47
Figure IV.4 La puissance demandée par la charge.....	47
Figure IV.5 Allure du courant $i_q(A)$ .....	47
Figure IV.6 Allure du couple de la génératrice synchrone à aimant permanent.....	48
Figure IV.7 Allure du courant $i_q(A)$ .....	48
Figure IV.8 Les courants de phase de la machine.....	48
Figure IV.9 Tension du bus continu (v).....	49
Figure IV.10 puissance eolienne produite.....	49
Figure IV.11 L'état de charge et de décharge de la batterie (State of charge)....	49

## *Liste des figures et des tableau*

---

Figure IV.12 Mode de fonctionnement.....	50
Figure IV.13 La puissance de la batterie.....	50
Figure IV.14 puissance de la pile a combustible.....	50
Figure IV.15 quantité d'hydrogene requise.....	51
Figure IV.16 puissance totale.....	51

### **La liste des tableaux**

Tableau 1 : Classification des piles à combustible.....	6
---	---

## *Acronymes*

**SEH** : Système d'énergie hybride.

**GSAP** : Génératrice synchrone à aimant permanent.

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

**MSAP** : La machine synchrone a aimans permanents.

**MPPT** : Recherche point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

**PEMFC** : Proton Exchange Membrane Fuel Cell.

**PAC** : Pile à combustible.

**VEs** : Véhicules électriques .

**H<sub>2</sub>** : Hydrogène.

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

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone.

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

**OTC** : La commande MPPT classique.

**SOC** : State of charge.

## *Symboles*

**$\omega$**  : Vitesse angulaire (rad/s).

**$\Delta\omega$**  : Déviation de la vitesse angulaire (rad/s).

**$f_0$**  : Fréquence nominale (GHz).

**$P_{incident}$**  : La puissance incidente du vent.

**$\rho$**  : Masse volumique de l'air (1,20 Kg/m<sup>3</sup> pour l'air à 20°C).

**S** : Surface balayée par les pales de la turbine éolienne en m<sup>2</sup>.

## *Acronymes et Symboles*

---

**$V_{\text{amont}}$**  : Vitesse incidente (amont) du vent en m/s.

**$V$**  : Vitesse de l'air.

**$Dm$**  : Débit massique d'air.

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

**$P_f$**  : Puissance développée par la force exercée.

**$X$**  : Ratio de vitesse.

**$C_p$**  : Coefficient de puissance.

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

**$\lambda$**  : La vitesse relative.

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

**$R_p$**  : Le rayon de pale de l'éolienne.

**$V_{\text{moy}}$**  : La vitesse du vent moyenne.

**$m$**  : Facteur d'idéalité.

**$P_v$**  : La puissance du vent par la turbine.

**$T_t$**  : Le couple de la turbine.

**$C_p$**  : Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

**$G$**  : L'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $W/m^2$ ).

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

**$S$**  : 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.

## *Acronymes et Symboles*

---

**P** : La puissance (W).

**A** : La surface effective des cellules.

$\lambda$  : Le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.

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

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

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

**R** : Résistances de chaque phase.

$T_t$  : 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.

$v_{a,b,c}$  : Les tensions de phase de la machine.

$i_{a,b,c}$  : Les courants de phase de la machine.

$L_c$  : L'inductance cyclique.

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique.

$E_{a,b,c}$  : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

**p** : Le nombre de paire de pôle.

$\omega$  : La vitesse du rotor avec ( $\omega=p.\Omega$ ).

$V_{ar}, V_{br}, V_{br}$  : 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.

**$\Phi_f$**  : Amplitude du flux des aimants permanents.

**$\theta$**  : Angle électrique du rotor par rapport au stator de la génératrice.

**$I_c$**  : Le courant qui traverse le condensateur.

**$V_{pac}$**  : Tension réelle d'une pile unitaire (Volt).

**$I_{pac}$**  : Le courant de la pile à combustible.

**$E$**  : Energie électrique appelée par la charge (wh/j).

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

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

**$V_{act}$**  : La chute de tension d'activation (volt).

**$V_{ohm}$**  : La chute de tension ohmique (volt).

**$V_{conc}$**  : La chute de tension de concentration (volt).

**$V_{act1}$**  : La chute de tension affectée seulement par température interne de la PEMF.

**$V_{act2}$**  : Dépendante à la fois du courant et de la température.

**$C^*_{O_2}$**  : La concentration de l'oxygène dans l'interface de la surface cathodique (mol/ cm<sup>3</sup>).

**$P_{cathod}$**  : Pression de l'hydrogène à l'anode.

**$P^*_{O_2}$**  : Pression partielle de l'oxygène (atm).

**$P^*_{H_2}$**  : Pression partielle à l'interface de l'hydrogène (atm).

**$\Delta G$**  : 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).

## *Acronymes et Symboles*

---

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

**$\eta_0, a, b$**  : Constantes empirique.

**I** : Le courant (A).

**$R_{ohm0}$**  : La partie constante de  **$R_{ohm}$** .

**$K_{RI}$  Et  $K_{RT}$**  : Les constante sempiriques.

**$I_{lim}$**  : Courant de limitation ou le courant maximal (A).

**z** : Le nombre d'électrons participants à la réaction.

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

**$n_{H_2}$**  : 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).

**$K_r$**  : 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).

**$\tau_{H_2}$**  : La valeur du temps de réponse du système associée au débit d'hydrogène en seconde.

**$V_{dc}$**  : La tension redressée.

**$I_{dc}$**  : Le courant modulé par le redresseur.

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

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

**$\lambda_{opt}$**  : La vitesse réduite optimale.

**$C_{p-opt}$**  : Le coefficient de puissance maximal.



**V<sub>v</sub>** : La vitesse du vent.

**P<sub>t</sub>** : La puissance en fonction de la vitesse de la turbine.

**$\Omega_t$**  : La mesure de la vitesse de rotation.

**$\Delta P_{\text{éol}}$**  : Les variations de la puissance éolienne.

**$\Delta \Omega_t$**  : La vitesse de rotation de la turbine éolienne.

**$\Delta \Omega_{t,\text{ref}}$**  : La consigne de la vitesse de rotation de l'éolienne.

**K** : L'erreur.

**CE(K)** : La variation de l'erreur.

**C'e** : Le changement d'erreur.

**P<sub>w</sub>** : La puissance éolienne.

**P<sub>pv</sub>** : La puissance photovoltaïque.

**P<sub>ch</sub>** : La puissance demandée par la charge.

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

**$\Delta P1$**  : La différence entre la puissance éolienne et la puissance demandée par la charge.

**$\Delta P2$**  : La différence entre la somme des deux puissances.

**$\Delta P3$**  : La différence entre la somme des trois puissances.

**A<sub>t</sub>** : La surface traversée par le vent.

**$\rho$**  : La densité de l'air (1.225 Kg/m<sup>3</sup>).

**E<sub>t</sub>** : L'énergie produite par le générateur éolien .

**$\Delta t$**  : Période de temps.

**P<sub>d</sub>** : La puissance à l'entrée de l'onduleur.

**N<sub>PAC</sub>** : Nombre de cellules de l'empilement.

## *Acronymes et Symboles*

---

**j** : Densité de courant ( $A/m^2$ ).

**S<sub>PAC</sub>** : Surface active des cellules ( $m^2$ ).

**V<sub>bus</sub>** : Tension du bus continue soit 465V.

**U<sub>stack</sub>** : Tension du stack en pleine charge soit  $U_{stack} = V_{bus}/2$ .

**E<sub>PAC</sub>** : Tension par cellule (V).

**P<sub>PAC</sub>** : Puissance électrique brute du stack (W).

**I<sub>pac</sub>** : Courant maximal de la pile à combustible.

**N<sub>ja</sub>** : Nombre de jours d'autonomie (2 jours).

**E<sub>L.m.max</sub>** : Charge mensuelle consommée (158.33kW/j).

**P<sub>D</sub>** : Profondeur de décharge (0.7).

**η<sub>bat</sub>** : Le rendement de la batterie (0.9).

**V<sub>bat</sub>** : Tension des batteries (12V).

**N<sub>m</sub>** : Le nombre de jours du mois qui présente la charge maximale (31jours).

## *Introduction Générale*

La consommation de l'énergie au niveau mondiale est liée étroitement à la population. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays en voie de développement ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour satisfaire ces besoins est le responsable majeur des rejets des gaz polluants, les études écologiques ont démontré que la consommation énergétique croissante est accompagnée par une augmentation énorme de l'émission des gaz toxiques dans l'atmosphère, ce qui cause la pollution de l'air et de l'eau.

Compte tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique, en exploitant les énergies propres sur la terre, comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc. Ils visent réduire au minimum la demande d'énergie provenant des sources classiques. En conséquence, une ville durable et propre dans son énergie, dans son climat et même dans sa nourriture [1].

Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois grandes familles, l'énergie d'origine mécanique (celle du vent), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...etc.) [1].

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles pour leur faible impact sur l'environnement. Malheureusement, jusqu'à maintenant, les puissances installées par les énergies renouvelables ne sont pas capables de concurrencer les grandes centrales actuelles à cause de leur intermittence et leur caractère fluctuant. Alors, il est indispensable d'utiliser des moyens de stockage pour assurer la continuité d'approvisionnement de l'énergie. Ces sources d'énergies renouvelables et les moyens de stockage associés constituent ainsi un système hybride [2].

Le système de génération hybride, peut être combiné à différents types d'énergies renouvelables associées avec des unités disponibles de stockage pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur. Dans ce contexte, on s'intéresse au système hybride éolienne, pile à combustible et batterie. Car c'est un système qui peut convenir pour une installation non connectée au réseau [2].

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride et avons fait une application sur une charge. Et par définition le système hybride est une combinaison de deux sources d'énergie, une classique et l'autre renouvelable. L'objectif principal de cette étude est d'incarner le système hybride sur la charge, et cela en utilisant à la fois l'éolienne, des piles

à combustible et des batteries pour stocker et transférer de l'énergie si nécessaire. Pour cela, notre travail sera structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une description des différents concepts de base liés au système hybride (éolienne, la pile à combustible et les batteries), en mentionnant leurs types, les avantages et les inconvénients ainsi que le principe de fonctionnement de chaque concept.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier, pour faciliter la simulation dans le troisième chapitre.

Le troisième chapitre c'est la simulation de système hybride, en utilisant Matlab-Simulink, en extrayant puis en comparant les différentes courbes.

Dans le dernier chapitre, nous avons fait la gestion d'énergie de système hybride.

***Chapitre I :***  
***généralités sur le***  
***système hybride***

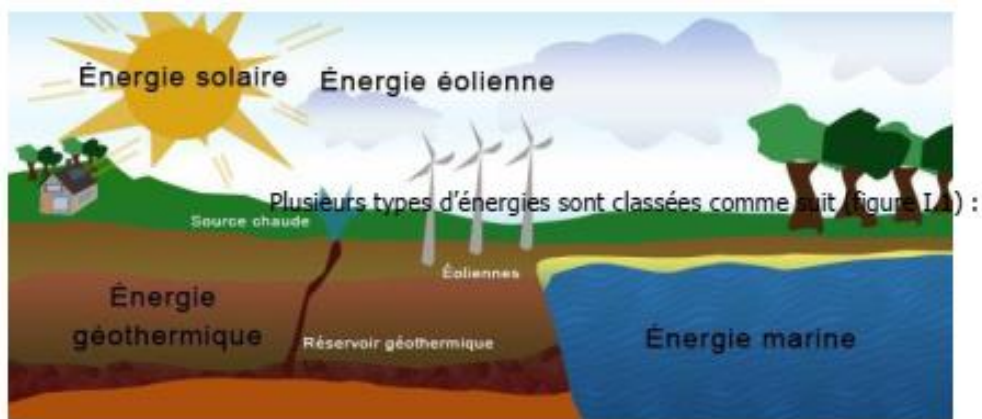
## I.1.Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années .Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. Nous allons donc choisir une partie de la source d'énergie pouvant être combinée pour obtenir un système hybride (éolienne à pile à combustible et batterie) fournissant une alimentation électrique permanente.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter l'analyse et le principe de fonctionnement des différents types de sources électriques d'un système hybride. Enfin, les différents composants constituant ces sources, feront partie de notre intérêt. Dans ce travail, les éléments fondamentaux qui constituent notre système hybride sont: l'énergie éolienne, pile à combustible et les batteries.

## I.2.L'énergies renouvelable

Plusieurs types d'énergies sont classées comme suit (figure I.1) :



**Figure I.1** Les énergies renouvelables [37].

### I.2.1.Définition

Est connue sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ressources naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau.

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs. De la terre alimentant des réseau de chauffage.Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le

colza, grace auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustivles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, « ENR ». En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [3].

### **I.3.L'énergie éolienne**

#### **I.3.1.Définition**

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique 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.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertir en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, propre sans rejet atmosphérique, géographiquement diffuse et sa source (vent) plus important en hiver. Cependant, le captage et la conversion d'énergie sont complexes, les matériaux coûteux et la source d'énergie difficile à prévoir et reste aléatoire [4].

#### **I.3.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne**

Dans la lignée des moulins à vent les éoliennes (appelées également aérogénérateur) utilisent la puissance du vent qu'elles transforment en électricité.

La vitesse du vent met en rotation des pales d'un rotor (entre 10 et 25 tours/min), source d'énergie mécanique. Le rotor entraine ensuite un générateur qui transforme ainsi l'énergie mécanique en énergie électrique. Un moteur électrique oriente la nacelle afin que son rotor soit bien positionné face au vent. Chaque éolienne se compose d'un mat de 20 à 100m selon la puissance des machines. Le mat se porte le rotor, le plus souvent équipé de trois pales, et la nacelle qui abrite le générateur et les auxiliaires électriques et mécaniques [5].

Les éoliennes sont prévues pour des vitesses du vent comprises entre 14 et 90Km/h. au delà un dispositif de freinage arrête automatiquement l'éolienne afin de sécuriser les équipements et d'en minimiser l'usure. C'est autour de 50Km/h que les éoliennes modernes fournissent leur puissance nominale [5].

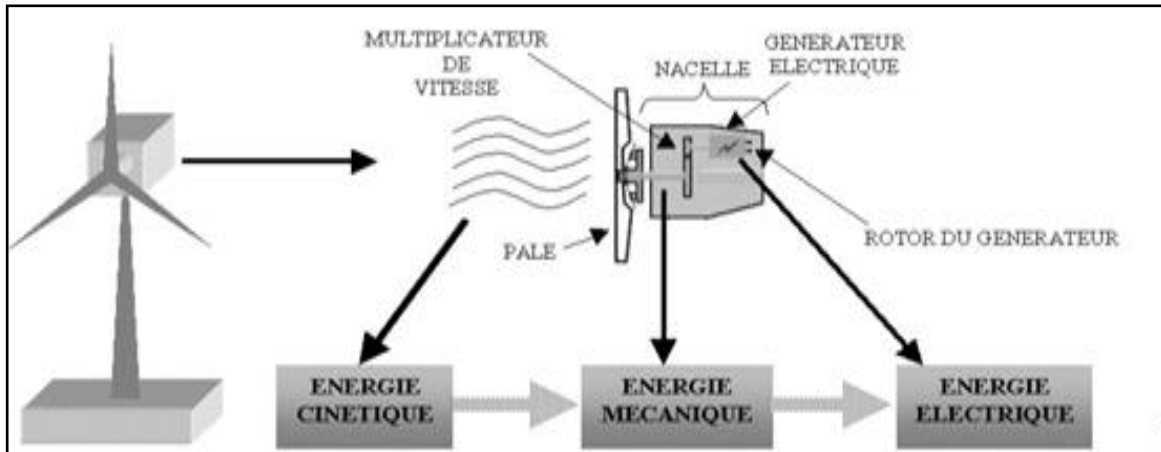


Figure I.2 Principe conversion de l'énergie cinétique du vent [5].

### I.3.3. Les types d'éoliennes

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

#### I.3.3.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [6].



Figure I.3 Eolienne à axe vertical [6].



**I.3.3.2. Eoliennes à axe horizontal**

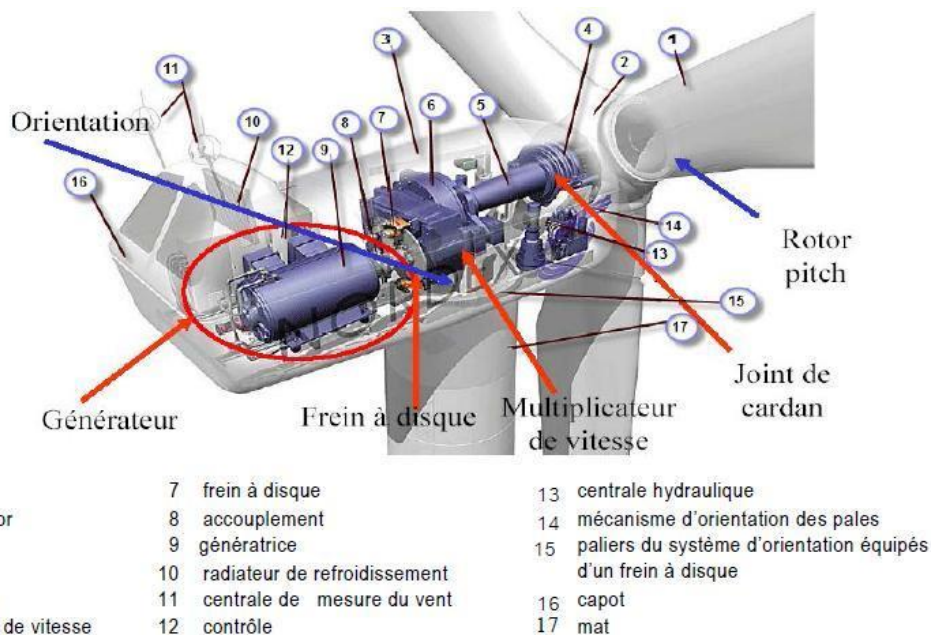
Les aérogénérateurs à axe horizontal (figure I.2) sont les plus utilisés actuellement comparativement à axe vertical puisque ils présentent un prix moins important. De plus, ils sont moins exposés aux contraintes mécaniques. Ils sont constitués d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le rotor tripales est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le prix et la vitesse de rotation du capteur éolien. Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont tripales à axe horizontal [7].



**Figure I.4** Eolienne à axe horizontal [7].

**I.3.4. Les composants d'une éolienne**

Les principaux composants d'une éolienne sont :



**Figure I.5** Différentes parties d'une éolienne [7].

- **La turbine éolienne**
- **La tour** : Un tube d'acier constitue la partie inférieure, il porte les autres composants.
- **La nacelle** : La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique :
  - a) **Un arbre primaire (lent)** : Il permet la transmission de l'énergie cinétique du vent au multiplicateur, il est équipé d'un système hydraulique de freinage pour le freiner, et d'un moyeu, ainsi que des pales, généralement trois.
  - b) **Un arbre secondaire (rapide)** : Il relie le multiplicateur avec la génératrice, tourne à la même vitesse que la génératrice.
  - c) **Un multiplicateur** : Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.
  - d) **le système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.
  - e) **Anémomètre** : C'est un système de mesure de vent qui transmet les signaux au système de contrôle de la génératrice.
  - f) **La génératrice** : Le rôle de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.
  - g) **Système d'orientation** : Il permet la régulation de la vitesse de vent, en décalant les pales [4].

## I.4. La piles à combustible

### I.4.1. Définition

La pile à combustible FC (Fuel Cell) produit l'électricité à partir d'une réaction chimique due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène (ou l'air) à travers une cathode avec un électrolyte entre l'anode et la cathode qui permet l'échange des charges électroniques (ions). Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge [9].

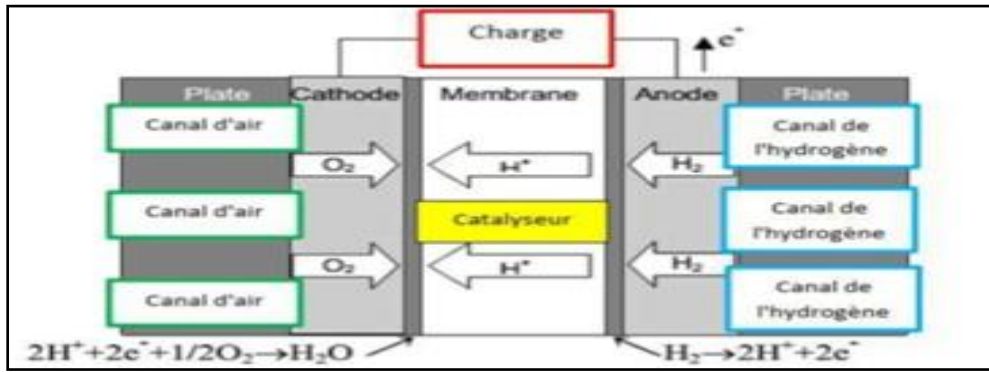


Figure I.6 Clarification d’une pile à combustible [9].

I.4.2. Les types de pile à combustible

Les types de la pile à combustible sont affichés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Classification des piles à combustible [10] .

Type de pile	Polymer Membrane FC	Direct Methanol FC	Phosphoric Acid FC	Alcalin FC	Molten Carbonate FC	Solid Oxid FC
Température	50-100°C	60-90°C	150-200°C	90-100°C	600-700°C	600-1000°C
Electrolyte	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Solution KOH	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Puissance de sortie	1-250kW	1-100kW	50kW-1MW	10-100kW	1kW-1MW	1kW-3MW
Combustible	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Méthanol	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)
Oxydant	Air	Air	Air	O <sub>2</sub> (pur)	Air	Air
Domaines d'application	Automobiles, Portable, Cogénération	Les petits portables	Centrale de production	Militaire Spatial	Centrale de production électrique	Centrale de production. Automobile (APU)
Rendement	53-58%	25-35%	>40%	60%	45-47%	35-43%

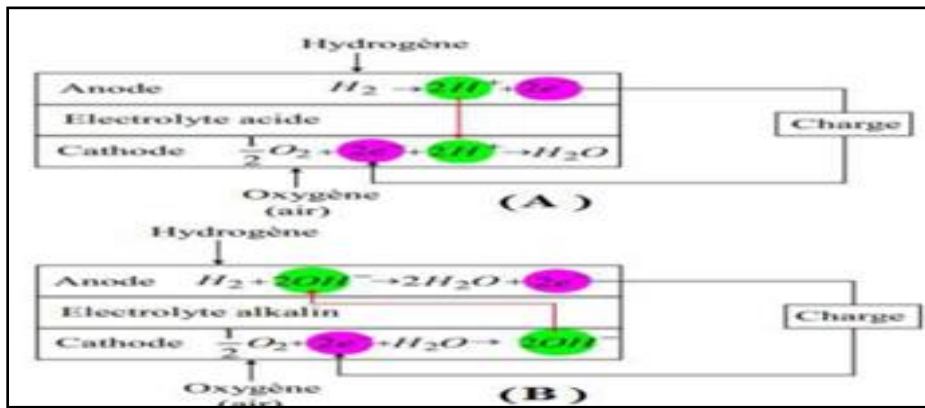
I.4.3. Principe de fonctionnement d’une pile à combustible

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible PEM est de produire électricité, eau, chaleur. Il est basé sur les processeurs inverses d’électrolyse de l’eau. Les réactions électrochimiques de une pile à combustible PEM dans pendant le fonctionnement de la pile à combustible PEM sont données par les équations suivante [11] :

Réaction anodique :  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  (1 1)

Réaction cathode :  $1/2 O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$  (1 2)

Réaction globale :  $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$  (1 3)



**Figure I.7** principe de fonctionnement de la pile à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B) [11].

#### I.4.4. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

##### A. Avantages :

- Les piles à combustible (PEMFC) produisent de l'électricité en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique.
- Un rendement de conversion important 53-58%; grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique.
- Pas de bruit, ce qui les rendra propres pour les applications domestique comme les écoles, les universités...etc.
- La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- Les piles à combustibles PEMFC sont plus fiables par rapport à d'autres méthodes classiques parce qu'ils n'ont pas des vibrations mécaniques et des pièces en mouvement, par conséquent, il n'exige pas beaucoup de maintenances [11].

##### B. Inconvénients :

- Le plus grand obstacle des piles à combustible est leurs coûts.

Une durée de vie faible spécialement si on aura un courant délivré subit des variations importantes et répétées [11].

## I.5. Batteries de stockage

### I.5.1. Définition

Une batterie est un appareil qui convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique. Il contient une ou plusieurs cellules. Chaque cellule est composée de trois parties principales: une électrode positive (borne), une électrode négative et un liquide ou un solide les séparant appelé électrolyte. Quand une batterie est connectée à un circuit électrique, une réaction chimique se produit dans l'électrolyte provoquant des ions (dans ce cas, un atome avec une tension électrique positive charge) pour le traverser dans un sens.

Avec des électrons (particules avec une charge négative) circulant à travers le circuit externe dans l'autre sens. Ce mouvement d'électricité la charge fait circuler un courant électrique dans la cellule et dans le circuit. Différents types de batteries sont produits pour différentes applications. Ils peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie éolienne [12].

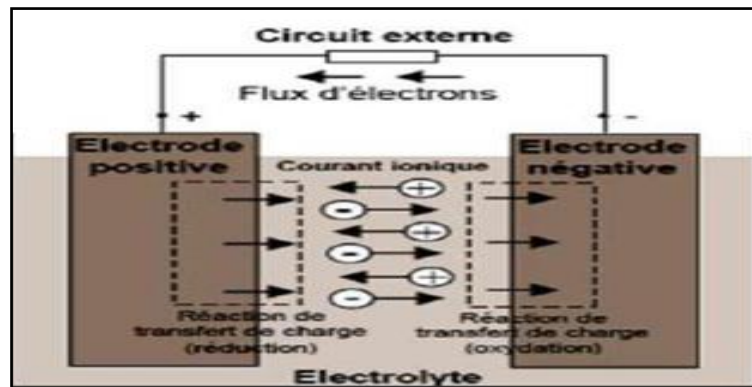


Figure I.8 Cellule électrochimique de base [12].

### I.5.2. Les types de batteries

Il existe deux types de batteries :

- **Batteries primaires** (batteries jetables): conçues pour être utilisées une fois et jeté.
- **Batteries secondaires** (batteries rechargeables) : conçues pour être utilisées rechargé et utilisé plusieurs fois. La plupart des batteries aujourd'hui avec le système d'alimentation hybride proviennent de la batterie rechargeable. Il existe plusieurs types de piles rechargeables [12].

## I.6. Systèmes hybrides

### I.6.1. Définition

Un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. De nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes [8].

Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources différentes permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [13].

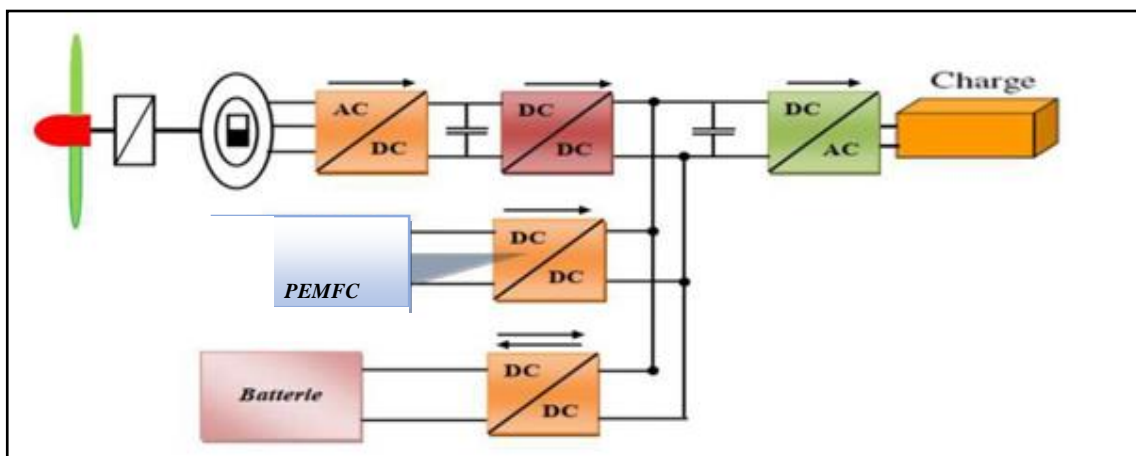


Figure I.9 Schéma synoptique du système d'énergie hybride [13].

### I.6.2. Avantages et inconvénients d'un système hybride

#### A. Avantages :

- Assurer la continuité énergétique.
- 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 [13].

**B .Inconvénients :**

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel [13].

**I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts de base concernant le système hybride. Nous avons appris que le système combine des sources d'énergie. Nous avons donc choisi ce système (éolienne, pile à combustible et batterie).

Nous ont permis d'inspirer quelques idées utiles pour le contrôle de notre système d'entraînement. La modélisation des composantes du système global qui seront l'objet du chapitre suivant.

***Chapitre II :***  
***Modélisation des***  
***différents composants***  
***du système hybride***



## II .1.Introduction

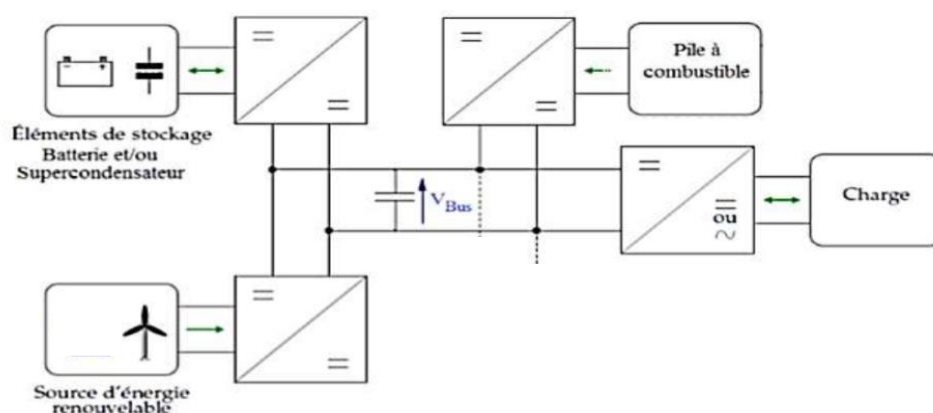
L'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application, de création d'emplois et de richesses [14]. Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [15]. Cependant, la prévision du vent s'avère très difficile parfois impossible et son profil est aléatoire (généralement fort en hiver et faible en été). Pour combler cette lacune, il faut équiper certaines éoliennes d'un système de stockage d'énergie, ou les utiliser comme énergie d'appoint (complémentaire) aux autres sources telles que l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité, l'énergie thermique, etc.

La modélisation est un moyen destiné à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, dans notre travail nous présenterons la modélisation des différentes parties d'un système hybride (système éolienne, batterie, la pile à combustible), afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler par la suite son évolution.

## II.2.Structure d'un système électrique hybride

L'hybridation des sources consiste à combiner deux ou plusieurs sources pour exploiter leurs différentes caractéristiques (Autonomie, Réversibilité, Dynamique). C'est le cas des véhicules hybrides qui associent deux ou plusieurs sources d'énergie de nature différentes caractéristiques pour la propulsion du véhicule.

Les systèmes électriques hybrides peuvent être représentés par la Figure (II.1). C'est une structure plus générale, sur la quelle on peut ajouter ou enlever les sources et les charges suivant la topologie du système [13].



**Figure II.1** Structure générale d'un exemple de système électrique hybride [13].

Pour le niveau de la tension du bus continu, il est en fonction de ses applications :

### II.3. Modélisation de la chaîne de production éolienne

Notre chaîne de conversion éolienne se compose d'une voilure qui capte l'énergie cinétique du vent couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes ; c'est la structure que nous retenons pour ce travail de modélisation et de simulation.

#### II.3.1. Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz)

Il est impossible de récupérer 100% de l'énergie du vent en énergie mécanique pour une éolienne. La théorie de Betz est une approche simplificatrice découverte en 1920 par le physicien allemand Albert Betz. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique que l'on peut extraire d'un flux d'air dans un domaine ouvert, indépendamment de l'éolienne utilisée [28], [27], [16]. Il a déterminé cette limite en considérant les hypothèses suivantes:

- On considère l'écoulement incompressible et stationnaire, et on raisonne en une dimension (1D) par tranches uniformes.
- On considère que l'air qui interagit avec le disque hélice de l'éolienne est constitué d'un cylindre à l'infini amont, et d'un cylindre à l'infini aval.
- On néglige l'interaction du vent environnant avec le sillage ainsi défini.

Betz calcule que:

- la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne.
- cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air. On peut regrouper ces résultats selon ces formules:

$$P_{\text{extrait}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{incidente}} \quad (2.1)$$

Avec :

$$P_{\text{incidente}} = P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{\text{amont}}^3 \quad (2.2)$$

Lorsque :

$$V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (2.3)$$

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

$S$  : surface balayée par les pales de la turbine éolienne en m<sup>2</sup>.

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

Cette démonstration repose sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides (théorème de Bernoulli, théorème d'Euler) [27].

Pour toutes les variables suivantes, l'indice 1 correspond à l'entrée des pales et l'indice 2 correspond à la sortie.

$\rho$  : Pression.

$V$  : Vitesse de l'air.

$D_m$  : Débit massique d'air.

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

$P_f$  : Puissance développée par la force exercée.

Dans le cas examiné le débit massique est constant :

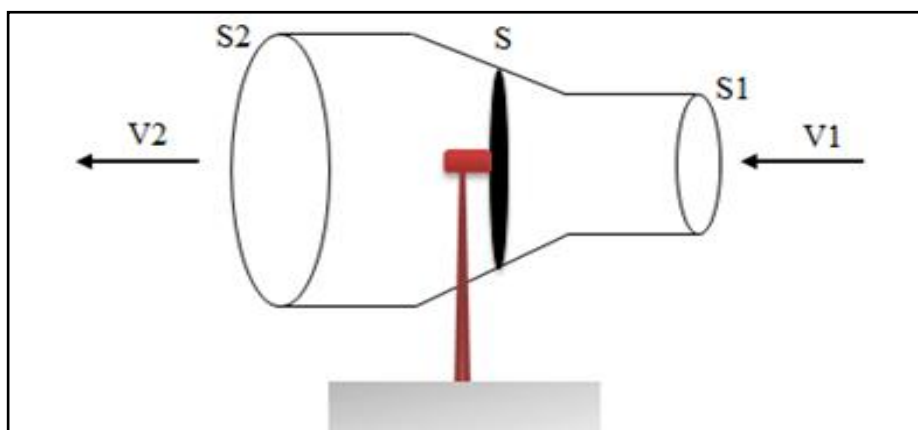
$$D_m = \rho.S.V = \text{cste.}$$

Considérons quatre points sur une même ligne de courant : un point en amont (sur  $S_1$ ), un point « juste avant » le capteur éolien proprement dit, un autre « juste après », et un dernier en aval (sur  $S_2$ ) :

Aux deux points loin du capteur éolien, sur  $S_1$  et  $S_2$ , la pression est égale à la pression atmosphérique  $p_0$

Aux deux points proches du capteur, la section est égale à la surface  $S$ , comme le débit massique est constant la vitesse du vent est la même en ces deux points :  $V$ . En revanche il y a une discontinuité de pression entre ces deux points.

On applique le théorème de Bernoulli deux fois, d'une part entre l'amont et le point juste avant, d'autre part le point juste après et l'aval ; on a donc [28], [27].



**Figure II.2** Tube de courant autour d'une éolienne [28].

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.4)$$

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.5)$$

La soustraction (2.4), (2.5) donne :

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.6)$$

La force exercée par le vent sur le capteur :

$$F = (P_1 - P_2) \cdot S = \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_2^2) \cdot S = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.7)$$

Mais cette force peut aussi s'exprimer par application de la loi de Newton :

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} = Dm \cdot \Delta v = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.8)$$

L'égalité des deux expressions (2.7) et (2.8) implique que  $V = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$  et la puissance développée par cette force est :

$$P_f = F \cdot V = \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_2^2) \cdot S \cdot V \quad (2.9)$$

Si on exprime cette puissance en fonction de  $x = \frac{V_2}{V_1}$

Avec :

$x$  : ratio de vitesse.

$C_p$  : coefficient de puissance.

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

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (2.10)$$

On obtient :

$$V = V_1 \cdot \frac{1+x}{2} \quad (2.11)$$

Et :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} (1 - x^2)(1 + x) \quad (2.12)$$

On peut alors tracer le coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne en fonction du ratio de vitesse  $x$ , Le maximum est atteint pour  $x = \frac{1}{3}$  et alors  $C_p = \frac{16}{27}$ . D'où la limite de Betz :

$$P_{\text{extrate}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{incident}}$$

Le calcul fait un certain nombre d'hypothèses qui font de ce maximum un majorant, et non un maximum atteignable. Des calculs modernes plus élaborés [16], [17] montrent que le

maximum est plus bas. À la limite de Betz, le vent voit sa vitesse divisée par trois; pour maintenir le même débit, la surface de sortie doit donc être multipliée par trois.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

On définit alors un coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation suivante:

$$C_p = \frac{P_{axtrate}^{max}}{P_{incidente}} \quad (2.13)$$

on peut écrire donc :

$$P_{extrate}^{max} = C_p(x) \cdot P_{incidente} = \frac{1}{2} \cdot C_p(x) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (2.14)$$

et :

$$\lambda = \frac{R_p \cdot \Omega_{t_1}}{V_1} \quad (2.15)$$

Avec :

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

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

On note que ce coefficient de puissance  $C_p$  peut évoluer pour le même type de turbine en fonction du nombre des pales 1, 2, 3 et 4, mais sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0.59). Et pour la même turbine ce coefficient peut varier aussi en fonction de l'angle de calage qui indique le degré d'inclinaison des pales [4].

### II.3.2. Fonctionnement optimal d'une éolienne

La Figure II.3 représente le diagramme de puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent. Trois zones que peut fonctionner l'éolienne :

- Zone 1 : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine ; la vitesse de rotation la puissance mécanique sont alors égales à zéro.
- Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$  pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_{fin}$ .
- Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur

valeurs nominales afin de ne pas en dommagier l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales P). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci [8].

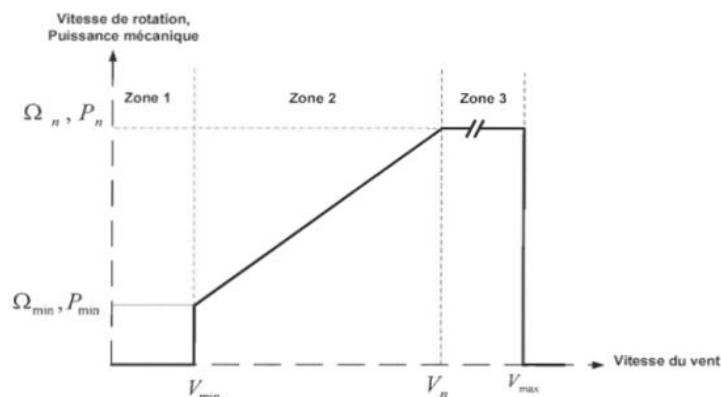


Figure II.3 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [8].

### II.3.3. Modélisation de la vitesse du vent

Considérons le système éolien à axe horizontal qui est le sujet de notre étude représenté sur la figure (I.2) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre  $V_1$  et  $V_2$ , soit [19]:

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{2.16}$$

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \tag{2.17}$$

La puissance  $P_v$  alors extraite du vent par la turbine s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_v = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{2.18}$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{2.19}$$

Si l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace avec une vitesse  $V_1$  pouvait être complètement récupérée par une turbine, la puissance instantanée serait:

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (2.20)$$

### II.3.4. Modélisation de la turbine éolienne

Pour simuler la turbine, on utilise la relation du couple associée à la caractéristique  $C_p(\lambda)$ . Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante [20].

$$T_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{V_v^3}{G \cdot \Omega_t} \quad (2.21)$$

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 $C_p(\lambda)$ de la voilure :

La courbe caractéristique de la voilure utilisée pour l'étude de ce système éolien est présentée sur la figure (II.10).

Les points remarquables de cette courbe sont le rapport de la vitesse en bout de pales ( $\lambda_{opt}$ ) optimale et le coefficient de puissance maximal ( $C_p^{opt}$ ) sont donnés respectivement par:

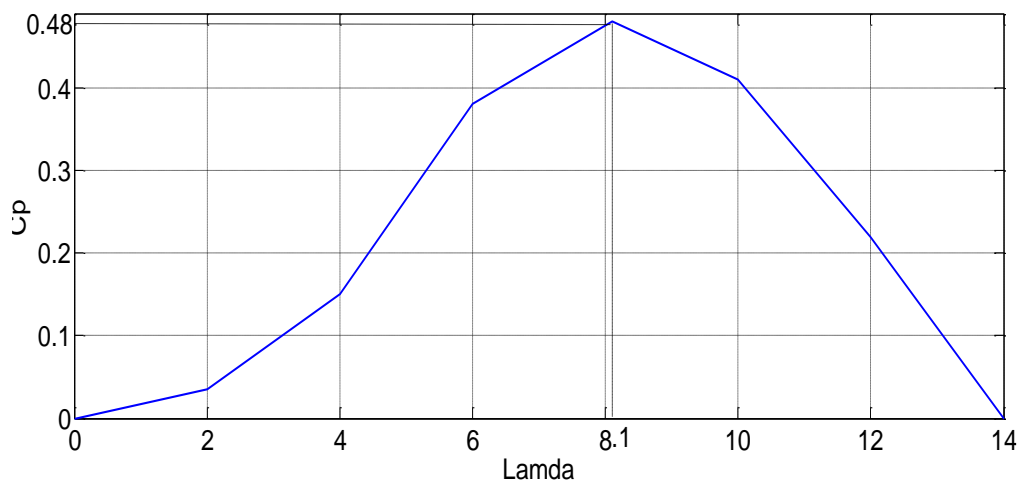


Figure II.4 Caractéristique  $C_p(\lambda)$ .

A partir de l'équation (II.2), l'expression de la puissance récupérée par la turbine éolienne est donnée par:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot A_t \cdot v_v^3 \quad (2.22)$$

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 donnée par :

$$\Omega_t = \frac{v_v \cdot \lambda}{R} \quad (2.23)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (2.24)$$

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.

### II.3.5. Le multiplicateur de vitesse

La puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice asynchrone à cage. Un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

Le modèle du multiplicateur peut être décrit par les équations suivantes :

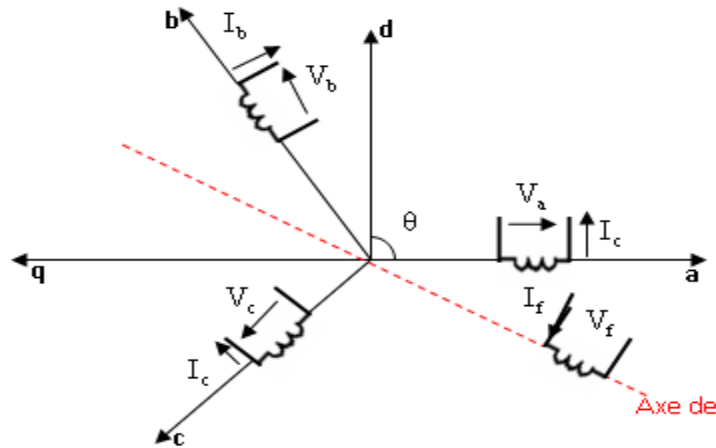
$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (2.25)$$

### II.3.6. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

La modélisation de la génératrice synchrone et primordiale pour concevoir des systèmes de commandes performantes, ceci consiste à décrire son comportement par un modèle mathématique, la génératrice à aimant permanent dans sa configuration exacte est complexe.

La structure générale d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents est présentée par la figure (II.11) :





**Figure II.5** Représentation symbolique de la MSAP [12].

Il s'agit d'une machine multi pôle. Lors de la modélisation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées, permettant ainsi une mise en équations particulièrement simple [21].

- La non saturation du circuit magnétique.
- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air. Le rotor est donc (lisse) du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position.
- La force magnéto motrice induite est à répartition sinusoïdale.
- Les pertes fers et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.

### II.3.6.1. Equations électriques et magnétiques de la machine

- Equations des tensions et du couple :

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse, dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Le neutre est isolé et la somme instantanée des courants de phase est nulle.

Les équations des tensions (convention moteur) sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_a \\ E_a \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Avec :

$v_{a,b,c}$  : Les tensions de phase de la machine.

$i_{a,b,c}$  : Les courants de phase de la machine.

$L_c$  : L'inductance cyclique.

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique.

$E_{a,b,c}$  : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{p}{\omega} (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) \quad (2.27)$$

Avec :

$p$  : Le nombre de paire de pôle.

$\omega$  : La vitesse du rotor avec ( $\omega = p \cdot \Omega$ ).

La résolution de L'équation matricielle de la machine ainsi obtenue est trop complexe; Ainsi, pour simplifier cette équation, on fait appel à des transformations, l'utilisation de ces composantes permet une économie considérable du temps de calcul.

➤ Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP :

En reportant la transformation de PARK, dans le système d'équations (II.26), on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

L'expression des f.é.m est donnée par:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

L'expression du couple :

$$C_{em} = \frac{p}{\omega} (E_d I_d + E_q I_q) \quad (2.30)$$

Le système d'équation (2.16) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_c \frac{di_q}{dt} - L_c I_q \omega \\ V_q = R_s I_q + L_c \frac{di_d}{dt} - (L_c I_d + \Phi_f) \omega \end{cases} \quad (2.31)$$

L'expression du couple se réduit à :

$$C_{em} = \frac{p}{\omega} (E_q I_d) = p \Phi_f I_q \quad (2.32)$$

### II.4. Modélisation des convertisseurs

Le redresseur est un convertisseur statique qui assure la transformation d'énergie d'une source alternative en énergie continue, comme le montre le schéma ci-dessous :

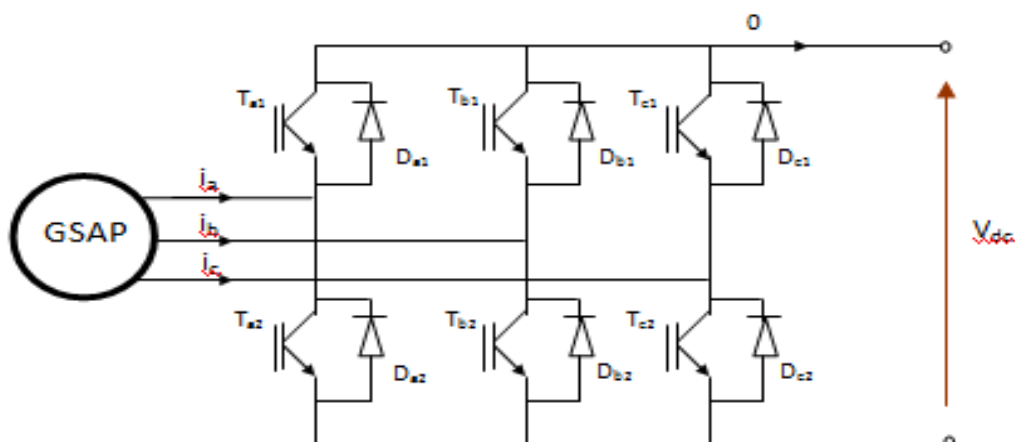


Figure II.6 Schéma du redresseur MLI [22].

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante [22] :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

$$I_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \tag{2.34}$$

Avec :

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

$V_{dc}$  : Tension redressée.

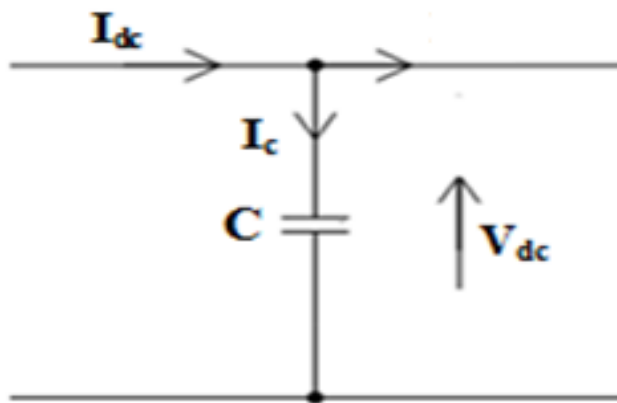
$I_{dc}$  : Courant modulé par le redresseur.

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

### II.5. Modélisation du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

Figure II.7 le bus continu  $V_{dc}$ .

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot I_c \quad (2.35)$$

Avec :

$I_c$  : Le courant qui traverse le condensateur.

## II.6. Modélisation de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. Cette technologie a connu un regain d'intérêt en tant que - alternative prometteuse pour la propulsion de chaînes de traction et pour des applications stationnaires. Les piles à combustible à Membranes Echangeuses de Protons (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell) opèrent à des températures relativement basses et disposent d'une densité de puissance élevée et d'un mode de fonctionnement simple et sûr. Ces avantages font des PEMFC des candidats sérieux pour la propulsion des véhicules électriques (VEs). Le principe de fonctionnement de la PàC est assez simple, il est basé sur le procédé inverse de l'électrolyse. Ce générateur génère de l'électricité en mettant en jeu un combustible et un comburant à travers un électrolyte [23].

### II.6.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible utilise de l'hydrogène et de l'oxygène pour former une réaction chimique, où l'hydrogène se dissocie en protons et en électrons. La réaction chimique est la suivante :



La tension de sortie de la pile à combustible,  $V_{pac}$ , est le produit entre le nombre de cellules (N) composant la pile à combustible et la tension de sortie d'une seule cellule (E), Cette tension s'exprime comme suit [24] :

$$V_{pac} = N * E \quad (2.37)$$

La tension de sortie d'une seule cellule de la pile à combustible,  $V_{PAC}$ , peut être définie comme:

$$V_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (2.38)$$

Avec :

N : Le nombre des cellules de la pile.

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

$V_{act}$  : La chute de tension d'activation (volt).

$V_{ohm}$  : La chute de tension ohmique (volt).

$V_{conc}$  : La chute de tension de concentration (volt).

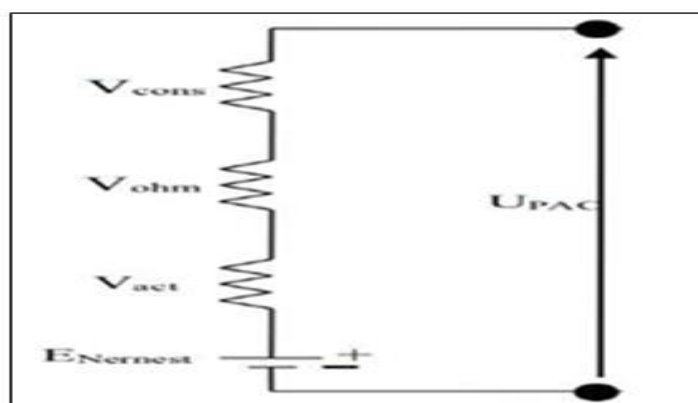


Figure II.8 Le Schéma équivalent d'une PEMFC [24].

### II.6.1.1. La tension de Nernst

C'est la thermodynamique potentiel de la cellule et il représente sa tension réversible. Cette tension s'exprime comme suit :

$$E_{nernt} = \frac{\Delta G}{2.F} - \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_0) + \frac{R.T}{2.F} \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (2.39)$$

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 (8.314J/K.mol).

L'expression de l'équation de Nernst arrangé avec un calcul numériques eprésente comme suit :

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[ \ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}) \right] \quad (2.40)$$

Les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène sont :

$$P_{\text{H}_2} = 0.5 P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} \left[ \exp \left( -\frac{1.635 \cdot I}{T^{1.334}} \right) \cdot \frac{P_{\text{anode}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}} - 1 \right] \quad (2.41)$$

$$P_{\text{O}_2} = P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} \left[ \exp \left( -\frac{4.192 \cdot I}{T^{1.334}} \right) \cdot \frac{P_{\text{cathode}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}} - 1 \right] \quad (2.42)$$

Avec :

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

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

$P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$  : La pression des aturation d'eau.

Elle est calculée avec :

$$\log_{10}(P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}) = -2.18 + 2.95 \cdot 10^{-2} T_c - 9.19 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 1.44 \cdot 10^{-7} T_c^3 \quad (2.43)$$

$$T_c = T - 273.15 \quad (2.44)$$

### II.6.1.2. La chute de tension d'activation

La chute de tension d'activation est provoquée par une réaction d'électrode lente. En d'autres termes c'est l'énergie nécessaire pour activer les réactions chimiques [25].

L'équation de Tafel, donnée ci-dessous, est utilisée pour calculer la chute de tension d'activation [26] :

$$V_{\text{act}} = \frac{R \cdot T}{a \cdot z F} \ln \frac{I}{I_0} = T \cdot [a + b \ln(I)] \quad (2.45)$$

D'autre part, l'équation empirique pour  $V_{\text{act}}$  est donnée en [27], où la constante ( $\eta_0$ ) est ajoutée comme suit à l'équation précédente :

$$V_{\text{act}} = \eta_0 + (T - 298) \cdot a + T \cdot b \cdot \ln(I) = V_{\text{act}1} + V_{\text{act}2} \quad (2.46)$$

Avec :

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

$V_{act1} = (\eta_0 + (T - 298) \cdot a)$  : La chute de tension affectée seulement par température interne de la PEMEC.

$V_{act2} = (T \cdot b \cdot \ln(I))$  : Dépendante à la fois du courant et de la température.

### II.6.1.3. La chute de tension ohmique

La résistance ohmique de la PEMFC consiste en la résistance de la membrane polymère, la résistance de conduction entre la membrane et les électrodes et la résistance des électrodes la chute de tension ohmique globale peut être exprimée par [28] ; l'utilisation de la loi d'Ohm s'écrit :

$$V_{ohm} = IR_{ohm} \quad (2.47)$$

Avec :

$R_{ohm}$  : La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée en fonction du courant et de la température, relation suivante [26] :

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + K_{RI} \cdot I - K_{RT} \cdot T \quad (2.48)$$

Avec :

$R_{ohm0}$  : La partie constante de  $R_{ohm}$ .

$k_{RI}$  et  $K_{RT}$  : Sont des constantes empiriques.

### II.6.1.4. La chute de tension concentration

Sur des densités de courant élevées, la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes devient un facteur limitant due aux gradients de concentration des réactifs, puisque à partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement. Donc on observe une décroissance proportionnelle à la densité de courant .

Ces pertes sont données par la relation suivante [28] :

$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{lim}} \right) \quad (2.49)$$

Avec :

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

$z$  : Le nombre d'électrons participants à la réaction.

## II.6.2. Taux d'hydrogène consommé

Le système de la pile à combustible consomme de l'hydrogène venant du réservoir de stockage en fonction de la demande de puissance. Pendant les conditions de fonctionnement, pour contrôle, le débit d'hydrogène en fonction de la puissance de sortie de la pile à combustible, une stratégie de rétroaction est utilisée [29].

Chaque gaz individuel sera considéré séparément et les équations des gaz parfaits lui seront appliquées. Ici, l'hydrogène sera considéré comme un exemple :

$$P_{H_2} V_{an} = n_{H_2} RT$$

(2.50)

Avec :

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

$n_{H_2}$  : 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).

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (2.51)$$

Avec :

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

Pour le débit molaire de l'hydrogène, il existe trois facteurs importants : débit d'entrée d'hydrogène, débit de sortie d'hydrogène et débit d'hydrogène pendant la réaction [24] :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (2.52)$$

La relation entre le flux d'hydrogène et la cheminée courant peut s'écrire :

$$P_{H_2}^r = \frac{N_s I_{pac}}{2F} = 2I_{pac} \times K_r \quad (2.53)$$

Avec :

$K_r$  : une constante de paramètre de modélisation [kmol/(s·A)],  $K_r = \frac{N_s}{4}$

$N_s$  : 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, une relation spécifique est dérivée entre la partie la pression et le débit d'entrée du combustible, la pression partielle d'hydrogène et d'oxygène sont données dans les équations (2.47) (2.49).

En utilisant l'équation (2.47), l'équation (2.49) peut être réécrit dans le domaine comme:

$$P_{H_2} = \frac{1}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad (2.54)$$

Avec :

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

$$\tau_{H_2} = (V_{an}) / (K_{H_2} RT)$$

(2.55)

### II.7. Modélisation du hacheur boost ( élévateur)

Le convertisseur Boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [30]. La figure (II.18) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé lorsqu' on désire augmenter la tension disponible d'une source continue.

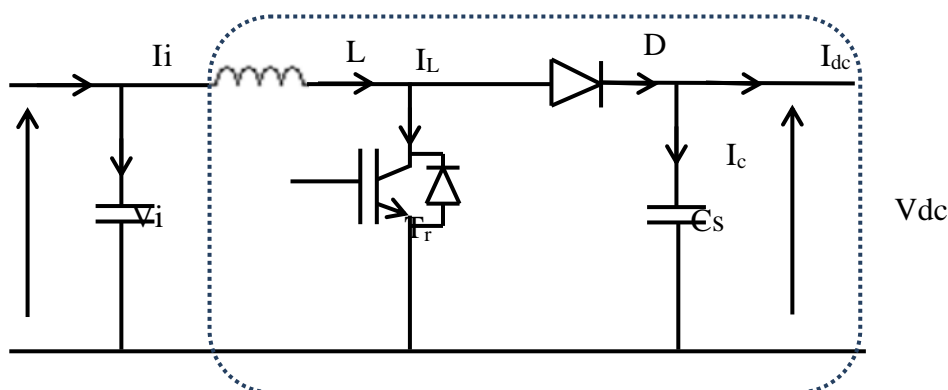


Figure II.9 Schéma de hacheur type boost [30].

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor Tr.

Dans la première phase Tr est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_i$  le courant traversant l'inductance augmente linéairement ; dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_i = V_L + V_{dc}$  Dans cette phase le condensateur  $C_s$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [31]. Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (2.56)$$

$$(1 - \alpha)I_L = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (2.57)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.49).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_i \quad (2.58)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \quad (2.59)$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

### II.8.Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances [32]. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, on utilise le modèle R-C, qui nécessite pas d'identification expérimentale de paramètres empiriques nécessaires à l'emploi des autres modèles couramment utilisés, et qui permet également le choix d'un simulateur à pas fixe dont le pas de calcul est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le model R-C comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie  $C_{bat}$  et une résistance interne  $R_s$ .

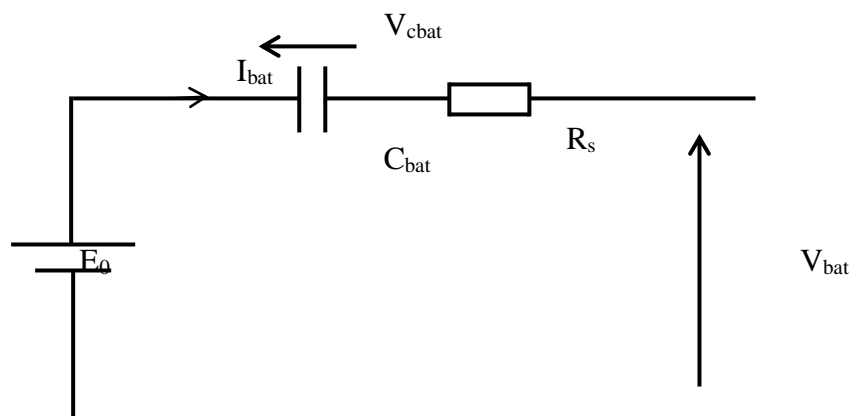


Figure II.10 Modèle R-C de la batterie [32].

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (2.60)$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{2.61}$$

Avec :

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

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

### II.9. Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [30]. Tandis que lorsque le transistor est fermé le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

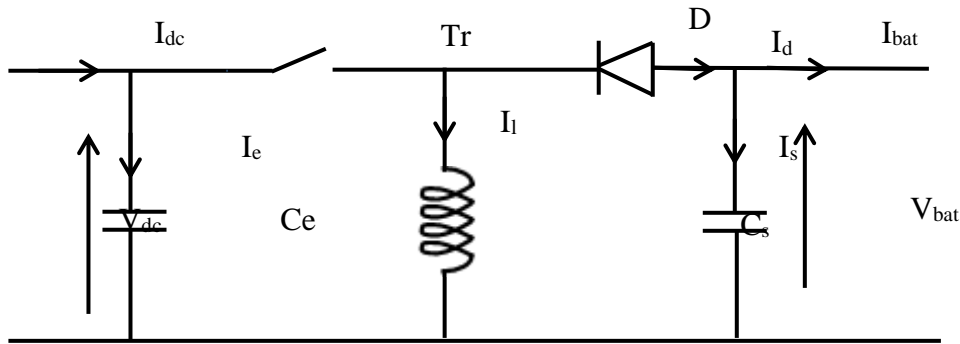


Figure II.11 Schéma d'un hacheur Buck-Boost [30].

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{bat} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{dc} \tag{2.61}$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire :

$$I_{bat} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{dc} \tag{2.62}$$

**II.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, la modélisation de chaque composant de la chaîne de conversion hybride a été élaborée à partir de modèles existants dans la littérature. Cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation.

On a constaté que les caractéristiques des différents générateurs (éolien, pile à combustible, batterie) présente une forte non linéarité. Afin de bien exploiter l'énergie fournie par ces sources on doit les commander par des techniques MPPT qui seront l'objectif de prochain chapitre.

***Chapitre III :***  
***Optimisation et la***  
***simulation du système***  
***hybride***

### III.1.Introduction

Après la modélisation des différentes parties d'un système hybride dans le chapitre précédent, dans ce chapitre nous allons simuler chaque partie de système globale (éolienne, pile à combustible et la batterie). Nous allons faire la simulation du système étudié sous MatlabSimulink pour obtenir les différentes courbes du système et la présentation des résultats.

Le principe de la commande appliquée consiste à contrôler la tension de la source d'énergie renouvelable de telle sorte qu'elles soient égales à la tension du bus à courant continu, quelque soit les variations de l'éclairement et de la vitesse du vent et d'extraire le maximum de puissance de la source renouvelable.

### III.2.Le système de conversion d'énergie éolienne

Composé de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui définit son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. En effet, la courbe de puissance en forme de cloche des éoliennes, nécessite une recherche du point de fonctionnement optimal, on parle, ainsi, de maximisation de la puissance (MPPT). Afin d'assurer le fonctionnement dans ces conditions optimales, il est nécessaire de définir les lois de commandes à appliquer. Pour cela, l'étude de l'optimisation de la chaîne de conversion éolienne par un algorithme MPPT est nécessaire.

#### III.2.1.Maximisation de la puissance MPPT

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en connaissant la caractéristique de la voilure éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique [33].

La courbe spécifique d'une turbine tripale possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé 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 :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V_p} \quad (3.1)$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho C_p(\lambda) \cdot S \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \quad (3.2)$$

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

$$T_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \quad (3.3)$$

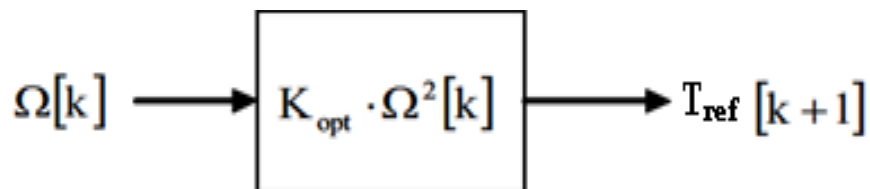
On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$T_{t-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (3.4)$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad (3.5)$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence montrée par la figure (III.1) [11].



**Figure III.1** Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation [11].

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal. La Figure (III.2) donne l'illustration graphique de ce mode de recherche du point maximal de puissance.

- La mesure de la vitesse de rotation  $\Omega_t$  engendre le calcul du couple  $T_{mec-ref}$ . Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromagnétique de la génératrice :

$$T_t - T_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \quad (3.6)$$

- Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique (3.6) pour atteindre, au pas de calcul suivant la vitesse  $\Omega_t$  ; où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée.
- Après quelques itérations, on atteint l'optimum à  $(T_{opt}, \Omega_{opt})$  correspondant à la puissance optimale  $P_{opt}(\lambda_{opt}, C_{p-opt})$ .

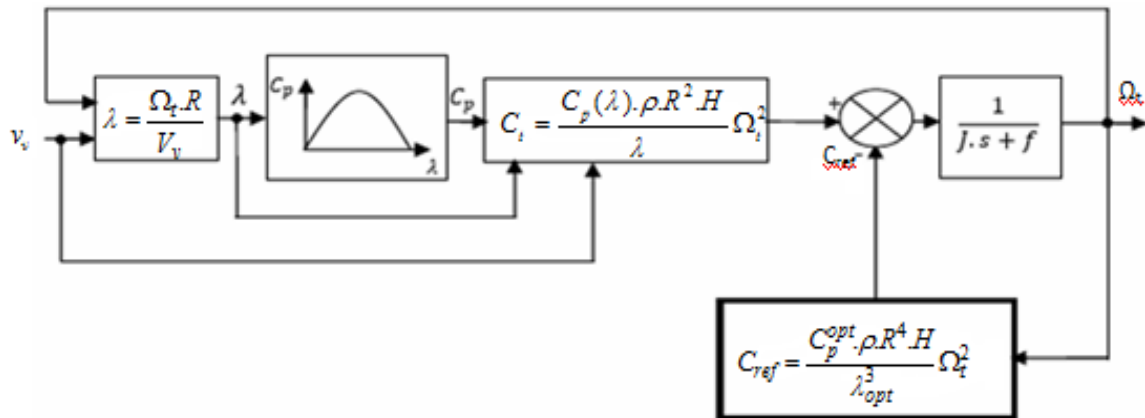


Figure III.2 Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT [34].

### III.2.2. La commande vectorielle

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [40].

Plusieurs stratégies existent pour la commande vectorielle des machines à aimants permanents. la commande par flux orienté est une expression qui apparait de nos jours dans la littérature, qui traitent les techniques de contrôle des moteurs électriques, cette stratégie consiste à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation comme cela est le cas dans une machine a courant continu. Puisque le principal flux de la MSAP est généré par les aimants du rotor, la solution la plus simple pour une machine synchrone à aimants permanents est de maintenir le courant statorique en quadrature avec le flux rotorique (le courant direct  $I_d$  nul) , indiquant un fonctionnement à un flux constant, égal au flux de l'aimant permanent  $\Psi_f$  et le courant statorique est réduit à la seule composant :  $I_q : (I_s = I_q)$ . Ce dernier commande le couple électromagnétique ( $C_e = p i_q \Phi_f$ ), qui donne un couple maximal contrôlé par une seule composante du courant ( $I_q$ ) pour le réglage de la vitesse via la tension  $V_q$ , ceci vérifie le principe de la machine à courant continu [40].



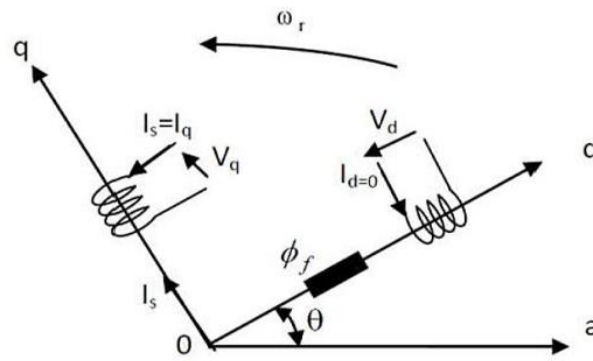


Figure III.3 Principe de la commande vectorielle [40].

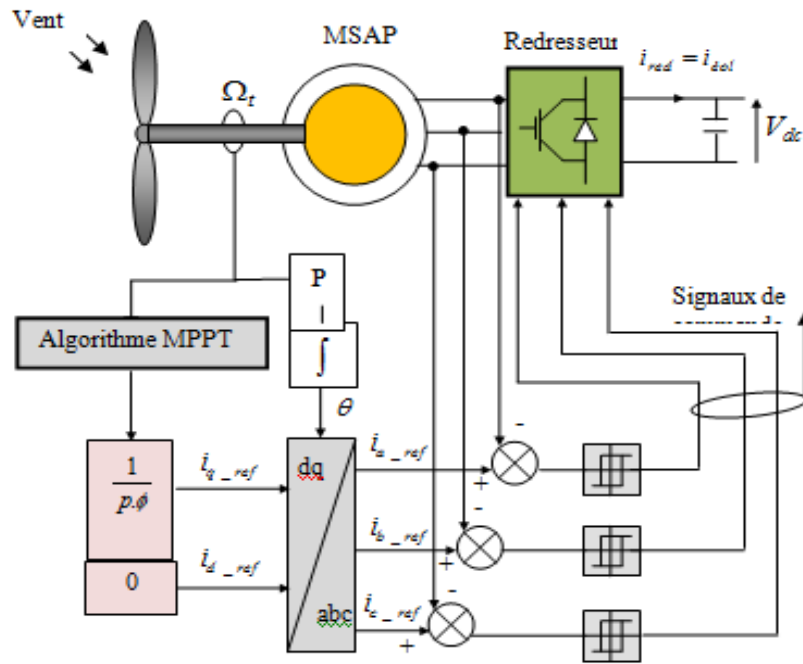
### III.2.3. Commande de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ...), il est nécessaire de contrôler instantanément le couple. Ceci peut se faire en agissant sur les courants statoriques réels ou sur leurs composantes directes et en quadrature [35].

Le principe de la commande vectorielle vise à simplifier cela par un choix judicieux du repère d'axe ( $O_d, O_q$ ) qui se traduit dans le cas d'une machine synchrone par le choix d'un repère lié au rotor, dans le but de décrire le comportement de la machine synchrone d'une manière simple, analogue à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

Dans le cas d'une machine synchrone à aimants permanents à pôles lisses, l'expression du couple est donnée par la relation (II.15). Étant donné que le flux rotorique est fixe, on remarque que ce couple ne dépend que de la composante en quadrature du courant  $i_q$  et il est maximal, pour un courant donné si l'on impose ( $i_d = 0$ ).

Dans notre cas il s'agit d'une commande vectorielle en couple, dont le courant d'axe  $d$  ( $i_{d\_ref}$ ) est maintenu nul pour minimiser les pertes joules. Le courant d'axe  $q$  ( $i_{q\_ref}$ ) est déterminé à partir du couple de référence issu de l'algorithme MPPT. A partir de ces courants, et en utilisant des régulateurs à hystérésis, on commande les interrupteurs du redresseur de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références, la sortie des comparateurs est reliée à la logique de commande du redresseur d'une manière à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant s'écarte de la valeur d'hystérésis de sa référence. Le schéma général de la commande est représenté par la figure (II.10).



**Figure III.4** Schéma bloc de la commande appliquée au système de conversion éolien.

### III.2.4.Simulation du fonctionnement de générateur éolien avec l'algorithme MPPT classique(OTC)

Pour vérifier le fonctionnement de générateur éolien avec l'algorithme MPPT, on applique un échelon de vitesse du vent :

- Dans la figure (III.5) on a la vitesse du vent, avec que si on a une vitesse de 8m/s, puis à  $t=2s$  on diminue la vitesse à 6 m/s.
- Dans la figure (III.6) on a la vitesse de la turbine, on remarque que la vitesse de la turbine varie proportionnellement avec la vitesse du vent. L'entraînement de la turbine éolienne commence à partir d'une vitesse nulle et se stabilise au bout de 0.5 s
- Dans la figure (III.7) on a la de puissance de la turbine, on remarque que la puissance diminue avec la diminution de la vitesse du vent.
- Dans La figure (III.8) on a le coefficient de puissance  $C_p$ , représente l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps, qui est constant même avec la variation de la vitesse du vent. Donc le fonctionnement à puissance maximale est respecté.
- Dans La figure (III.9) on a la couple électromagnétique de référence et du couple mesuré, Le couple électromagnétique étant négatif indique le fonctionnement en mode génératrice. On remarque que la valeur du couple suit sa référence et s'adapte avec les variations de la vitesse selon la puissance fournie.

- Dans Les figure III.(10.11) on a le courant  $i_q$  mesuré avec sa référence, qui est maintenu presque nul indépendamment du courant suivant l'axe indirect ( $I_q$ )
- Par contre, l'allure du courant ( $I_q$ ) montre l'influence de la variation de la vitesse qui a introduit une variation du couple électromagnétique de la génératrice synchrone à aimant permanent.

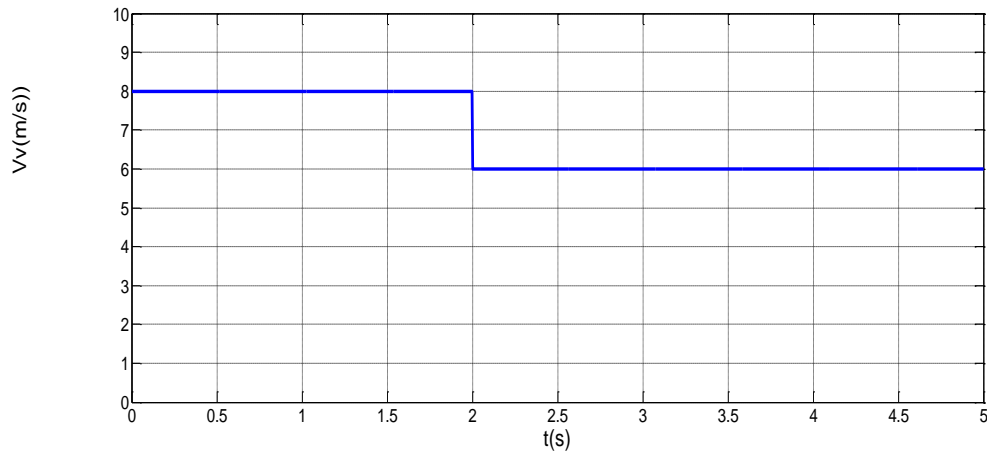


Figure III.5 Allure de la vitesse du vent.

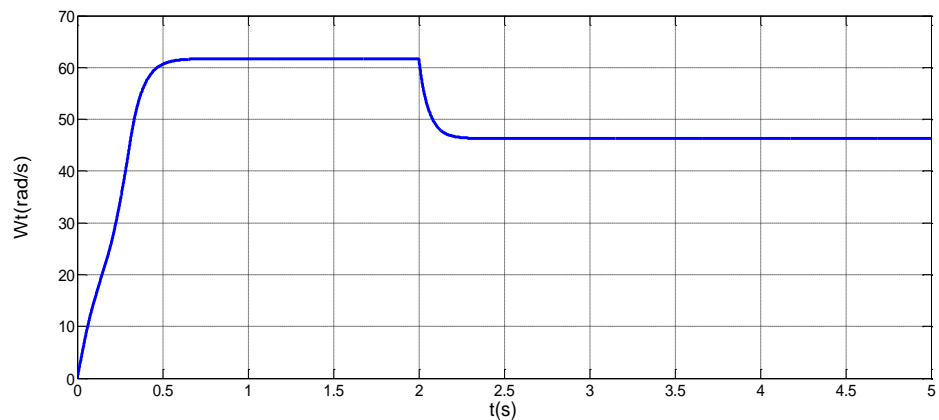


Figure III.6 Allure de la vitesse de la turbine.

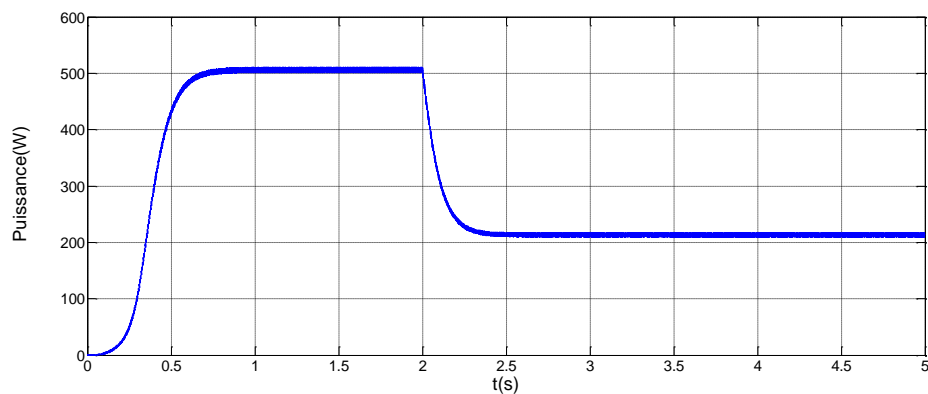


Figure III.7 Allure de puissance de la turbine.

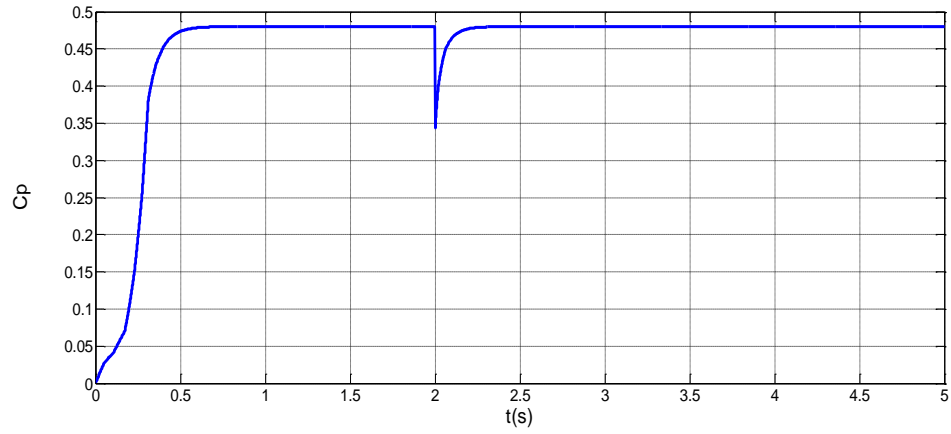


Figure III.8 Allure du coefficient de puissance  $C_p$ .

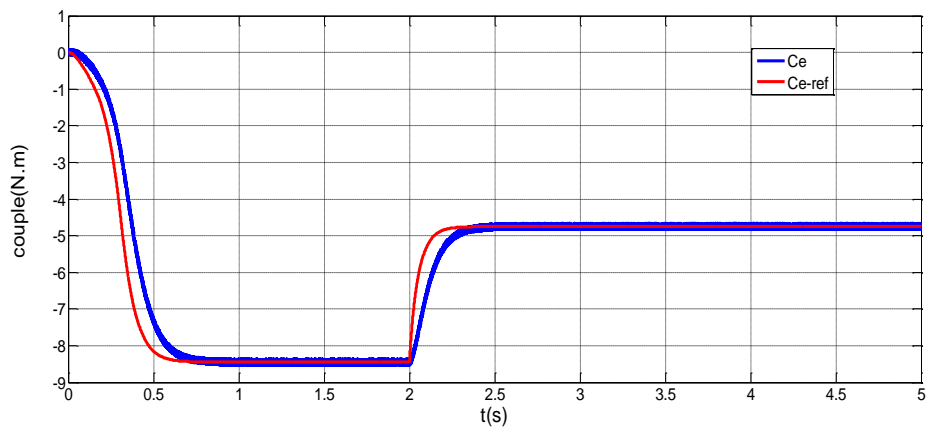


Figure III.9 Allure du couple électromagnétique de référence et du couple mesuré.

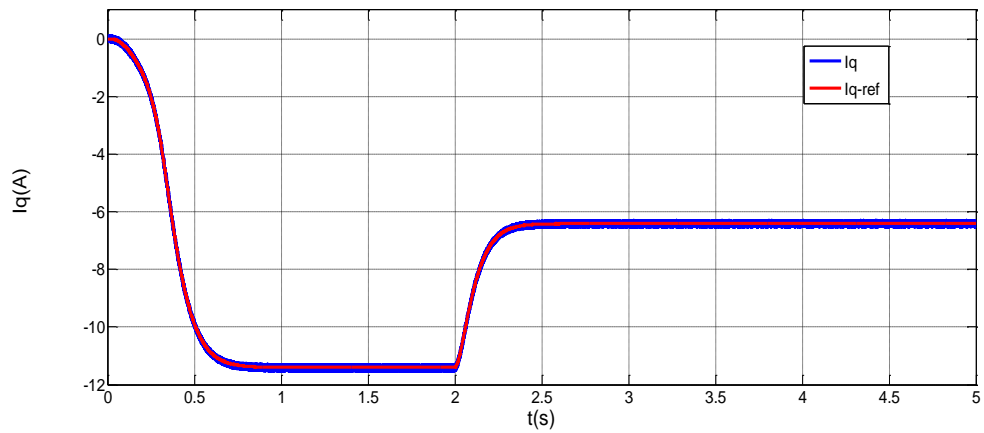
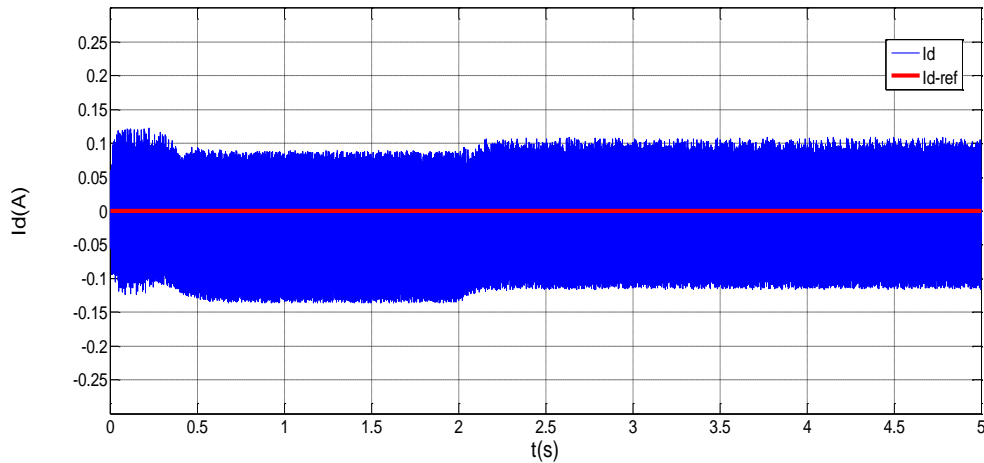


Figure III.10 Allure du courant  $i_q$  mesuré avec sa référence.



**Figure III.11** Allure du courant  $i_d$  mesuré avec sa référence.

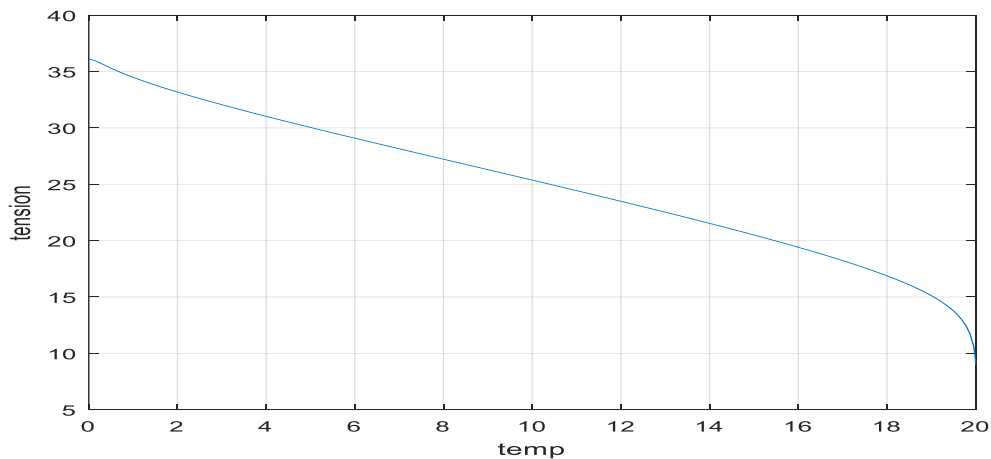
Avec que la vitesse de vent constant dans le système éolienne.

### III.3.la pile a combustible PEMFC

#### III.3.1.Simulation de la pile à combustible

La pile est connectée sur le bus via un convertisseur DC-DC non réversible en courant (la puissance ne peut pas être récupérer sur la pile). On a contrôlé le système par un régulateur PI pour maintenir une tension constante du bus continu lors des appels de puissance.

Pour vérifier le fonctionnement de notre système on effectue le test suivant :



**Figure III.12** La tension de la pile à combustible.

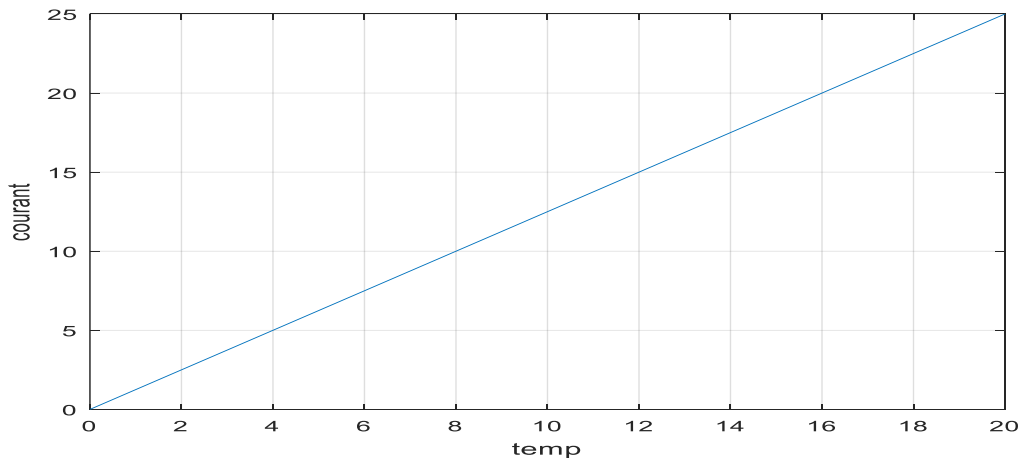


Figure III.13 Le courant de la pile a combustibile.

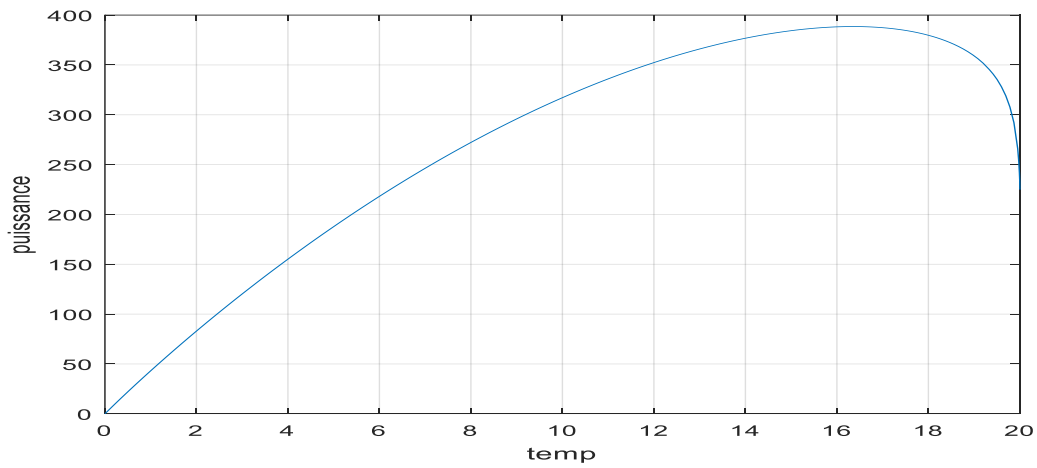


Figure III.14 La puissance de la pile à combustible.

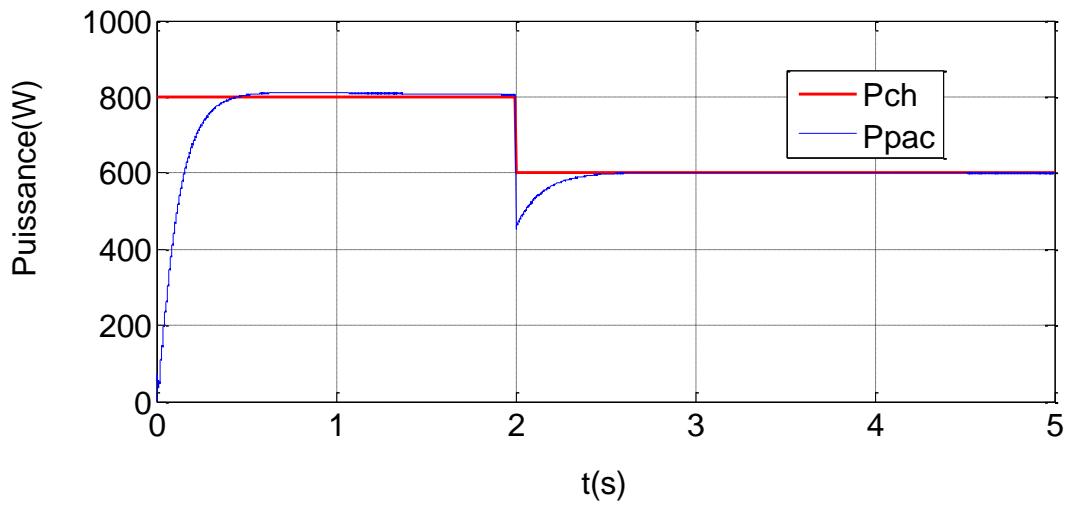
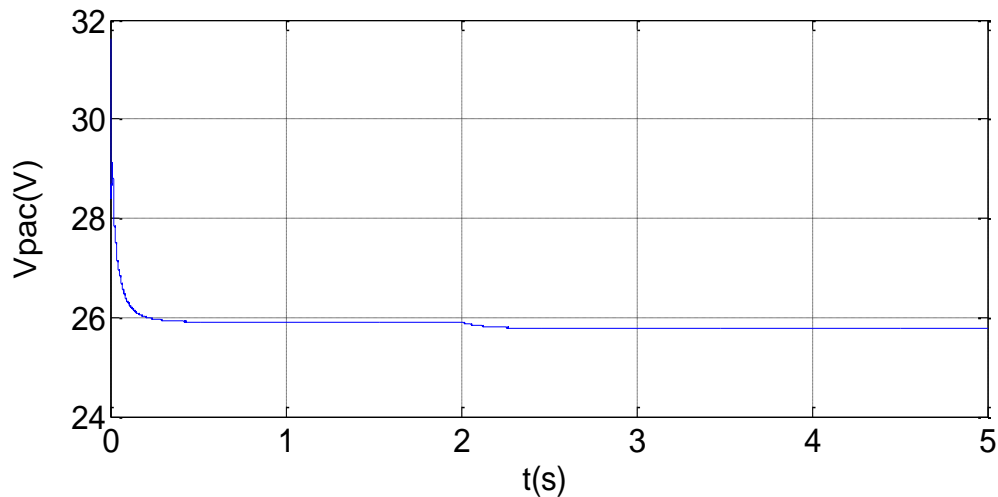


Figure III.15 La puissance de générateur avec la puissance de charge.



**Figure III.16** La tension du bus continu.

### III.3.2. Les commentaires sur les graphes de la simulation de la pile à combustible

Au départ, la puissance de la charge est de 800W, puis à  $t=2s$  on diminue la puissance à 600W :

- Dans la figure (III.12) on a la tension de la pile à combustible, on remarque que la tension de la pile à combustible diminue progressivement par rapport le temps (du 36V à 10V).
- Dans la figure (III.13) on a le courant de la pile à combustible, on remarque que le courant de la pile à combustible augmenter jusqu'à 25A par rapport le temps.
- Dans la figure (III.14) on a la puissance de la pile à combustible, on remarque que la puissance de la pile à combustible augmenter jusqu'à 390W dans  $t=16s$  apres dimunie 250W.
- Dans la figure (III.15) on a la puissance du générateur est présentée. On remarque que la puissance du générateur suit de la charge, malgré la perturbation provoquée par celle ci.
- Dans la figure (III.16) on a La tension du bus continu, on observe que la tension reste constante malgré la variation de la charge. Néanmoins on remarque qu'à  $t=2s$ , la charge varie et entraine une variation minime de la tension du bus continu durant des laps de temps insignifiants, puis cette tension reprend sa valeur initiale.

**III.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons d'abord commencé par le générateur éolien que nous présente une caractéristique non linéaire et nécessite un contrôleur MPPT, pour extraire le maximum de puissance produite par le système de conversion d'énergie hybride. La commande vectorielle a été appliquée à la génératrice à aimant permanent. Le deuxième générateur constituant notre système hybride a été commandé via un hacheur survolteur afin d'assurer toujours une tension constante du bus continu.



***CHAPITRE IV :***  
***GESTION d'ENERGIE***  
***D'un système hybride***

## IV.1.Introduction

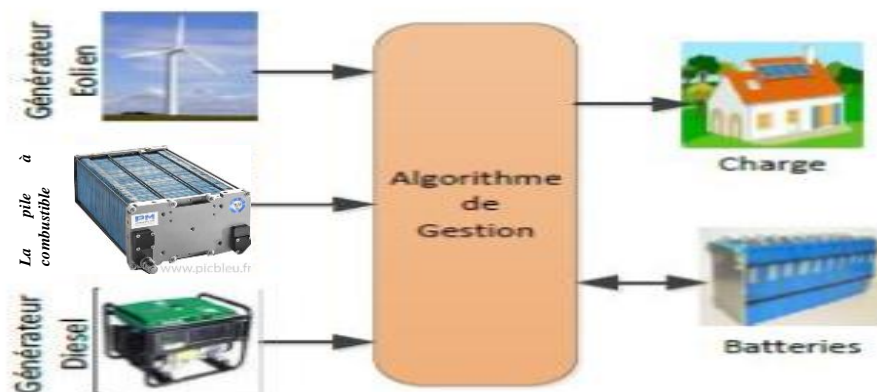
À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans le chapitre précédent pour les différents éléments, nous allons construire notre système globale composé d'une éolienne, pile à combustible, batterie et une charge variable. Nous terminons par simulation avec Matlab du système étudié et la présentation des résultats.

## IV.2.Gestion d'énergie

### VI.2.1.Stratégies de gestion du système hybride

L'objectif principal de la stratégie de gestion proposée dans cette thèse est de générer des références de puissance pour les sources (éolien, batterie et la pile a combustible) dans le but d'assurer d'une façon optimale, une alimentation sans interruption de la charge. Pour cela nous avons proposé un algorithme pour gérer les flux de puissances entre les différentes sources. Il est à base de règle logique "tout ou rien", avec objectif d'activer ou non les sources selon l'évolution de l'état du système hybride [37].

La figure (IV.1) illustre le rôle de cet algorithme qui se situe au cœur du système hybride.



**Figure IV.1** Schéma de principe de la stratégie de gestion.

L'objectif de l'algorithme de gestion est en fait, de déterminer les points de fonctionnement des sources du système hybride, dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant les sources d'énergie conventionnelles (générateur diesel, batteries). Une autre tâche que l'algorithme de gestion doit remplir consiste à exploiter d'une façon optimale la batterie de stockage dans le but de rallonger sa durée de vie. En effet, une bonne estimation de son état charge/décharge (SOC) est nécessaire. Il est évident que pour

préservé la batterie, il faut réduire sa sollicitation et ainsi favoriser l'énergie provenant des sources renouvelables.

### **VI.2.2.Principe de fonctionnement de l'algorithme de gestion**

Nous avons proposé une stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien comme étant la source principale pour alimenter la charge .

La batterie et la pile a combustible sont utilisées à la fois comme sources dans le cas d'un manque de production, et comme système de stockage dans le cas d'une surproduction.

Le principe de fonctionnement de cette stratégie de gestion est donné par cette algorithmes représenté par l'organigramme dans la figures (IV.2) .

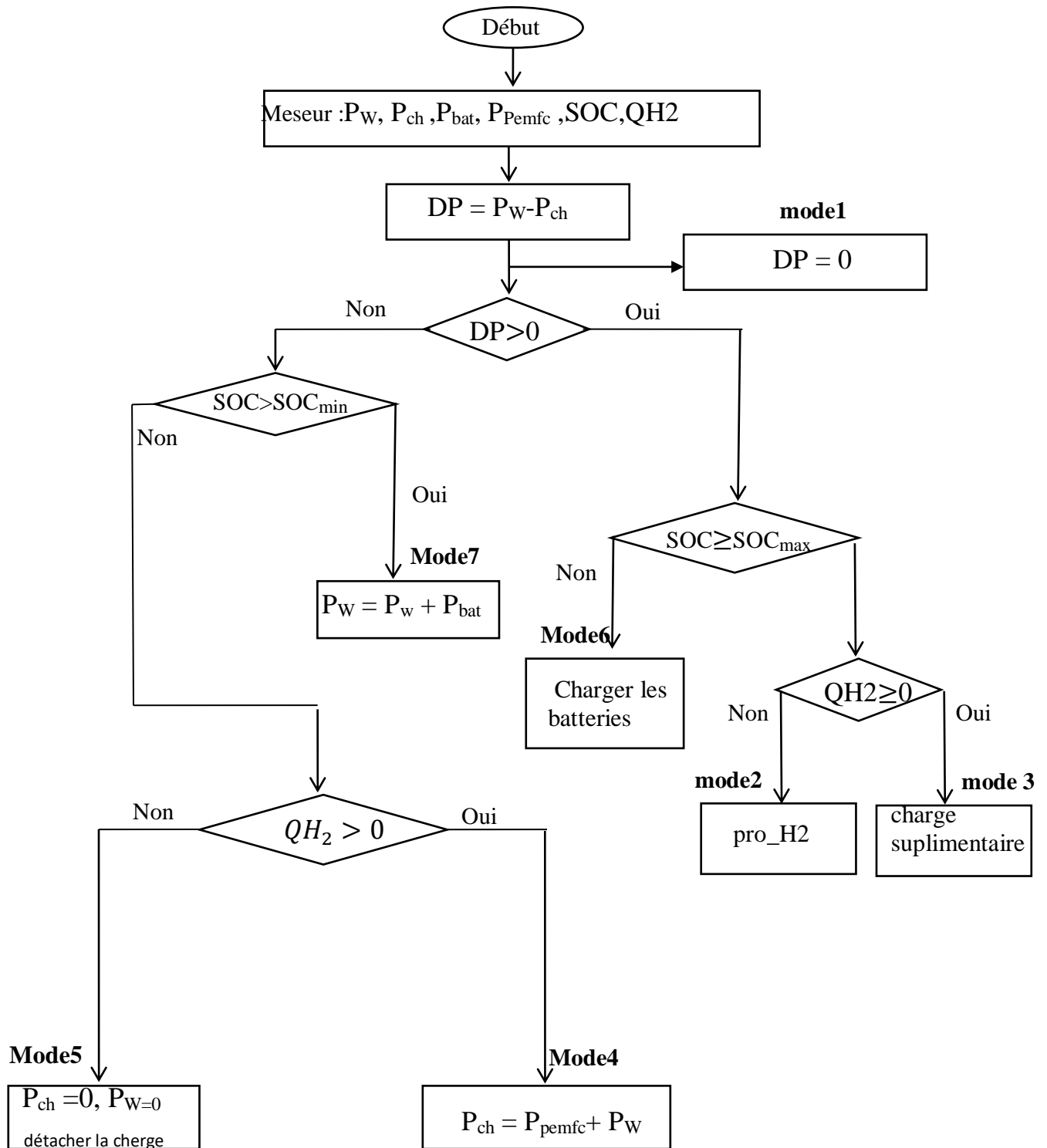


Figure IV.2 Organigramme de la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien.

Comme étant la source principale, Les différentes puissances sont désignées comme suit :

$P_w$  : La puissance éolienne.

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

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

$\Delta P_0$  : La différence entre la puissance éolienne et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta P_0 = P_w - P_{ch} \quad (4.1)$$

Cet organigramme reprend toutes les situations possibles aux quelles le système hybride peut-être amené à faire face. En fonction de la situation, l'algorithme prend la décision d'activer ou désactiver la source du système. Dans le cas d'une surproduction d'énergie, l'algorithme ordonne la charge de la batterie. L'éventuel surplus de puissance (PLD) sera dissipé avec la charge auxiliaire.

### VI.2.3. Résultats de simulation et discussions

Pour valider en simulation cet algorithme de stratégie de gestion, nous avons considéré pour cette stratégie quelques scénarios de simulation que le système hybride est amené à rencontrer.

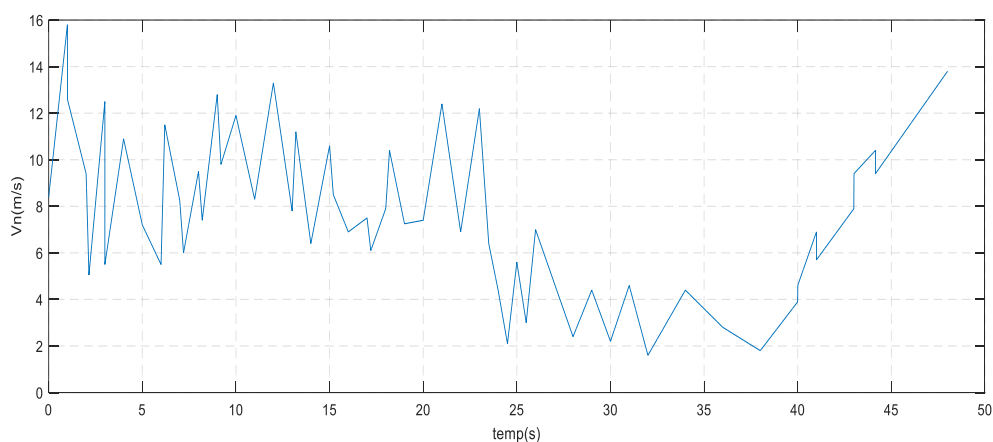
- Les résultats de simulations pour la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien comme étant la source principale sont donnés par les figures ci-dessous.

### IV.3. Simulation et résultats numériques

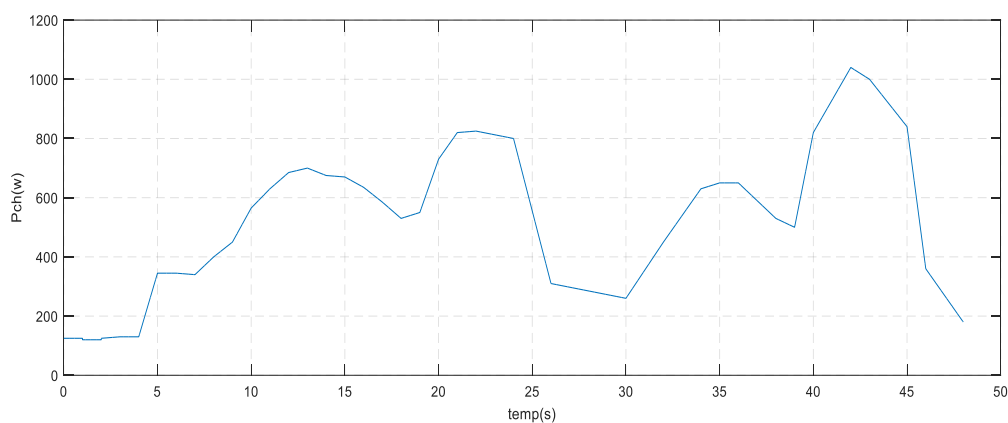
Notre système étudié est constitué de :

- Un sous système éolien composé d'une éolienne de 800w constituée d'une génératrice synchrone a aimant permanent, d'un redresseur relié aux batteries de stockage.
- Une pile à combustible qui est un générateur de secours produit l'énergie demander par la charge en cas de nécessité, elle est composée d'un stack de cellules et d'un boost.
- Un système de stockage constitué de 12 batteries plomb acide (12V, 100Ah) branchées en série, qui se chargent quand la production de d'énergie est supérieure à celle demandée par la charge et se déchargent dans le cas d'un déficit d'énergie.

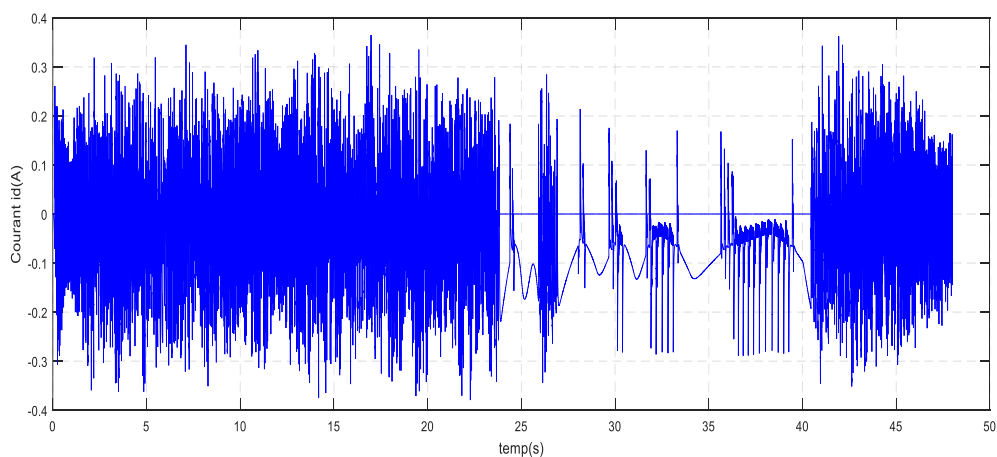
La simulation est faite sur Matlab/simuliken introduisant la température et la vitesse du vent de deux journées choisies d'été et d'hiver (IV.3), pour une charge dont le profil est montré sur les figures ( IV.4) :



**Figure IV.3** Vitesse du vent



**Figure IV.4** La puissance demandée par la charge.



**Figure IV.5** Allure du courant  $i_d$  (A).

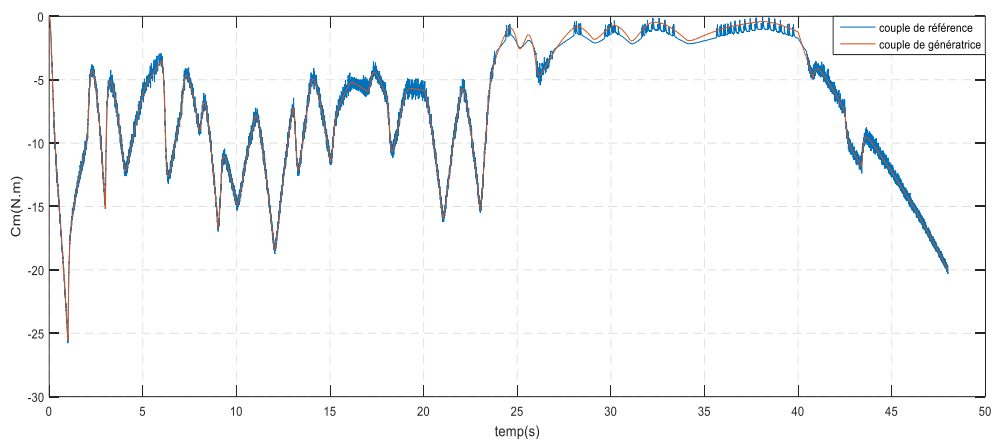


Figure IV.6 Allure du couple de la génératrice synchrone à aimant permanent.

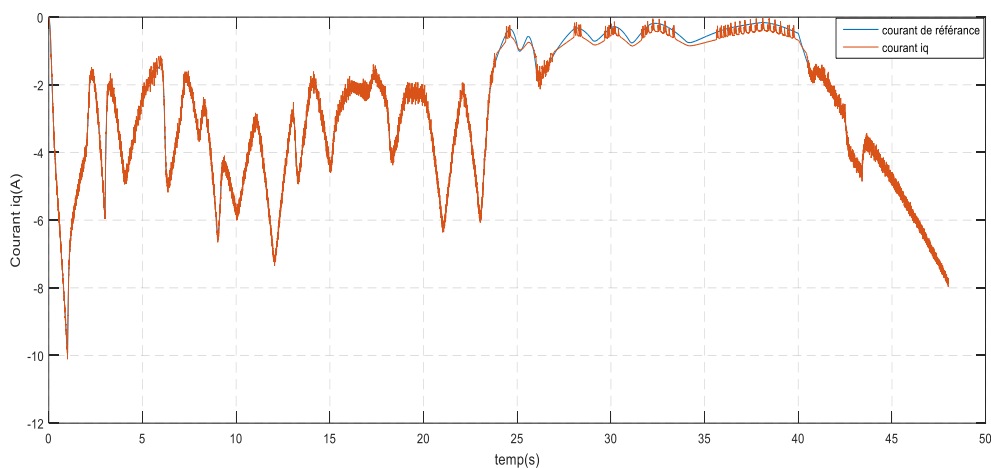


Figure IV.7 Allure du courant  $i_q$  (A).

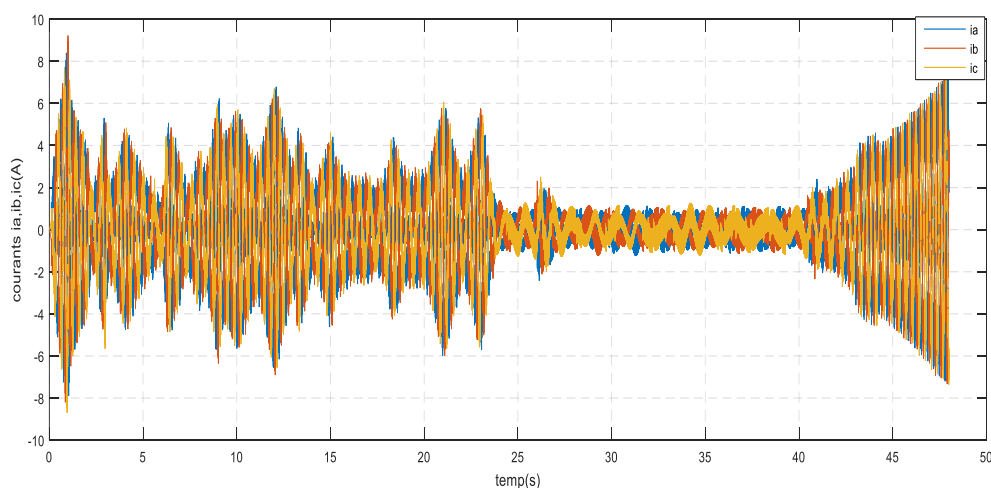
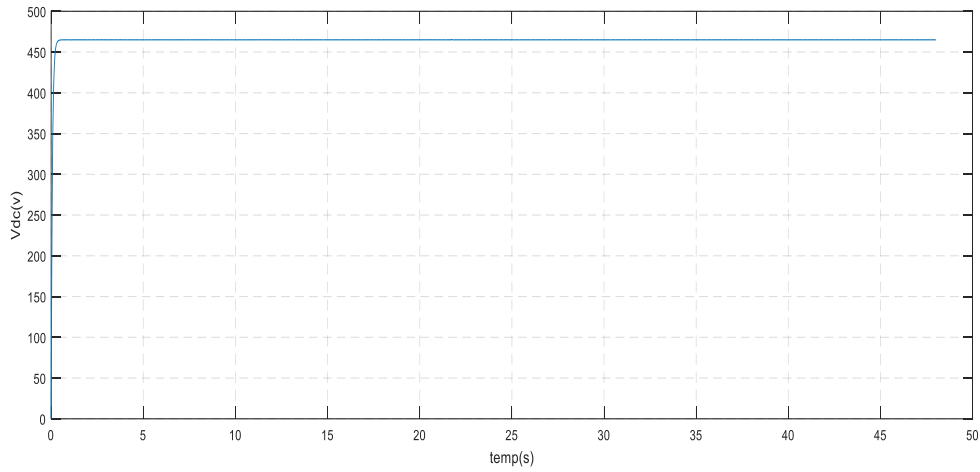
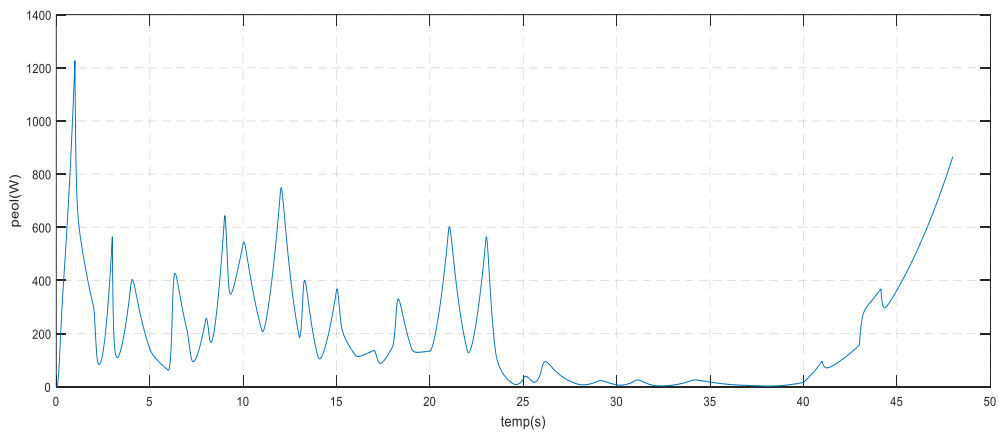


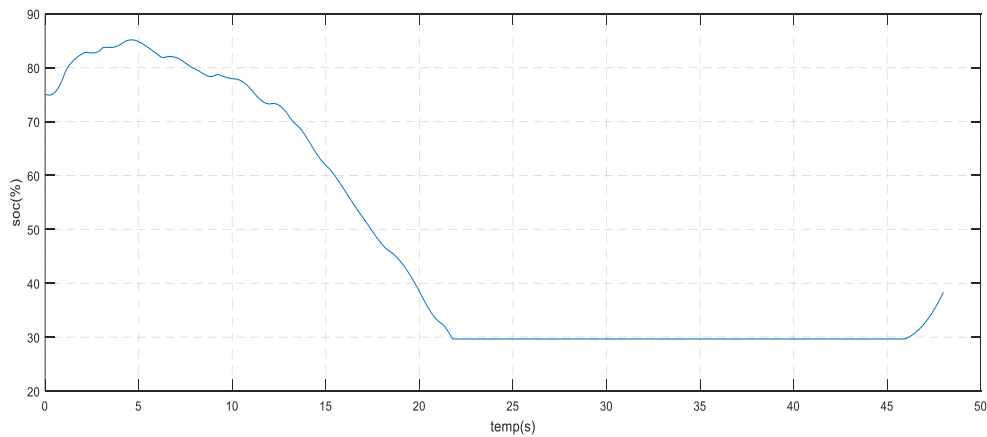
Figure IV.8 Les courants de phase de la machine.



**Figure IV.9** Tension du bus continu (v).



**Figure IV.10** puissance eolienne produite.



**Figure IV.11** L'état de charge et de décharge de la batterie (State of charge).



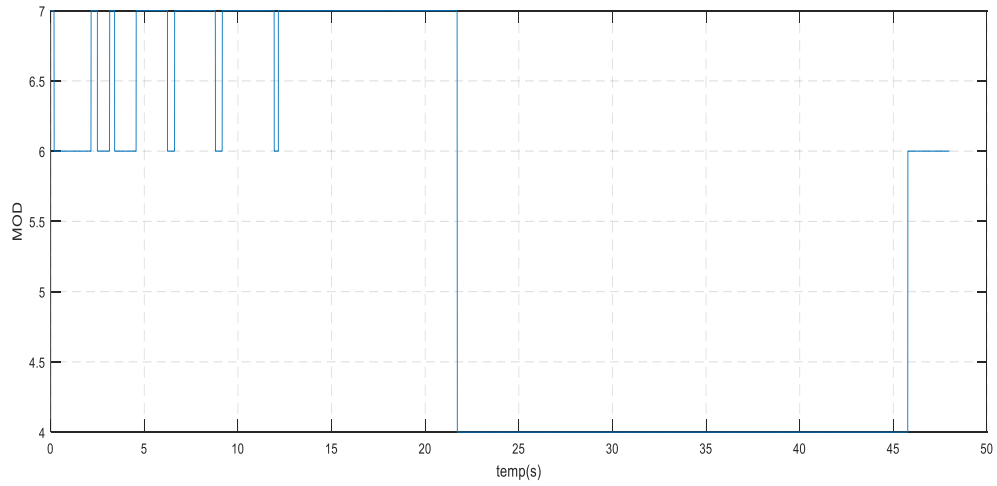


Figure IV.12 Mode de fonctionnement.

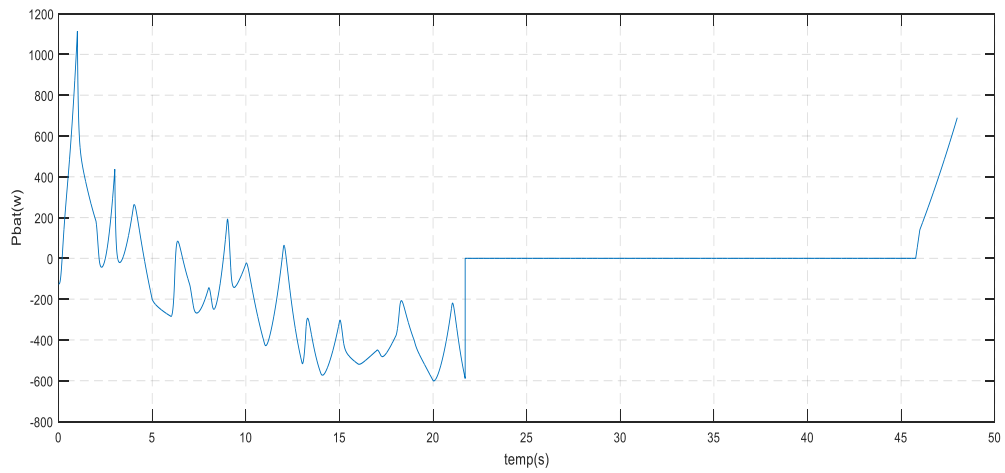


Figure IV.13 La puissance de la batterie.

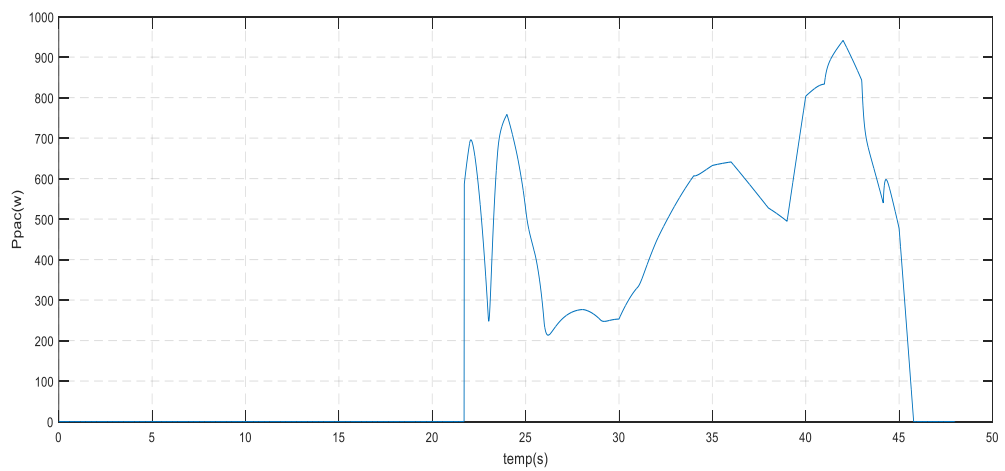


Figure IV.14 puissance de la pile a combustible.

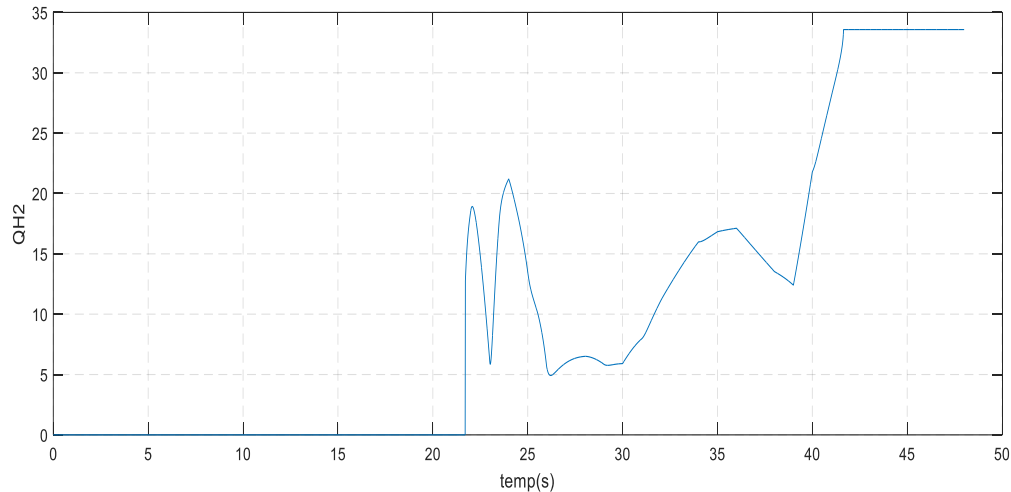


Figure IV.15 quantité d'hydrogene requise.

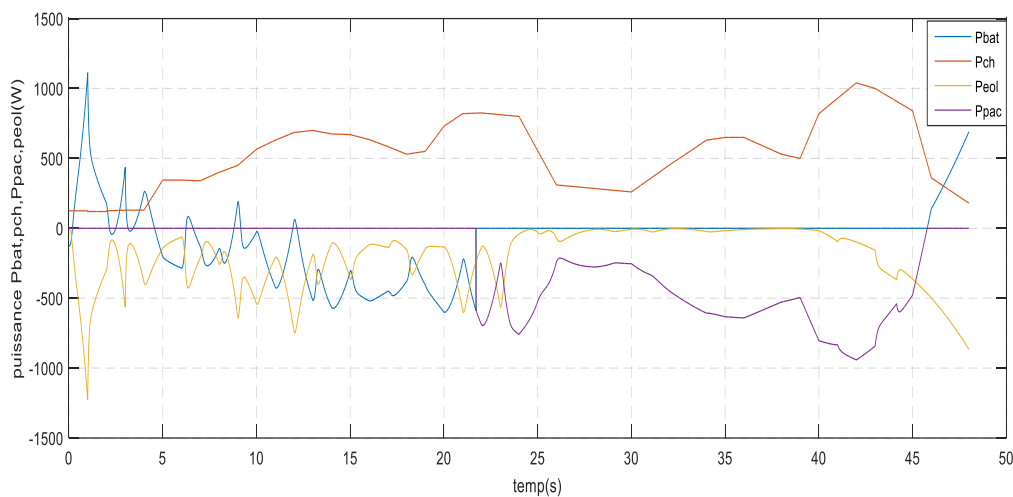


Figure IV.16 puissance totale.

### IV.3.1. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation sont obtenus sous conditions climatique variable durant deux jours successifs :

- Dans la figure (IV.5) on a le schéma du courant  $i_d$ , représente l'allure du courant suivant l'axe direct ( $I_d$ ) qui est maintenu presque nul indépendamment du courant  $i_q$ .
- Dans la figure (IV.6) on a allure du couple de la génératrice synchrone à aimant permanent,  $T_e$ , montre l'influence de la variation de la vitesse qui a introduit une variation du couple électromagnétique de la génératrice synchrone à aimant permanent.
- Dans la figure (IV.7) on a allure du courant  $i_q(A)$ , qui a la meme forme que le couple electromagnetique ce qui verifie le pricipce de la commande vectorielle.

- Dans la figure (IV.8) on a les courants de phase (Ia,b,c) de la machine, afficher les courants de phase de la machine synchrone à aimants permanents qui sont d'une forme sinusoidale.
- Dans la figure (IV.9) on a la tension du bus continu, qui reste constant, et varie peu avec la variation de la charge.
- Dans la figure (IV.10) on a la puissance optimale produite par le générateur éolienne, on peut bien remarquer qu'elle suit la variation du vent.
- Dans la figure (IV.11). on a l'état de charge de la batterie, selon la disponibilité de la puissance produite par les générateurs, on remarque l'état de charge de la batterie varie entre 30 et 90% pour orienter une décharge profonde ou bien une surcharge.
- Dans la figure (IV.12) on a la variation des modes de fonctionnement en fonction des variations des conditions climatiques, selon l'algorithme de gestion d'énergie qui présente une grande fiabilité dans l'alimentation de la charge sans interruption.
- Dans la figure (IV.13) on a le courant de la batterie qui montre l'état de charge et decharge de la batterie.
- Dans la figure (IV.14) on a la puissance produite par la pile à combustible dans le cas où la production de l'éolienne et celle de la batterie n'est pas suffisante.
- Dans la figure (IV.15) on a la quantité d'hydrogène requise qui est produite par le catalyseur afin d'assurer la puissance demandée par la charge dans le cas où la pile à combustible intervient.
- Dans la figure (IV.16) on a la puissance totale de système hybride.

#### VI.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à un système de stockage plus une pile à combustible. Nous avons ainsi donné dans un premier temps une présentation de gestion d'énergie et son algorithme pour déterminer les points de fonctionnement des sources du système hybride dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge.

Pour valider en simulation cette stratégie de gestion, nous avons considéré quelques scénarios de simulation que le système hybride est amené à faire. Puis, les résultats des différents scénarios réalisés sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

# *Conclusion Générale*

---

## *Conclusion Générale*

L'objectif de ce mémoire est la gestion et optimisation d'un système hybride (éolienne, pile à combustible avec stockage).

A fin d'atteindre cet objectif, la répartition de ce travail en quatre parties a été adoptée.

Dans la première partie, on a procédé à la définition du système hybride, à partir des différents composants de ce système ainsi que leur principe de fonctionnement et leurs différents types. On a aussi cité les avantages et inconvénients de pile à combustible et de système hybride.

Nous avons présenté dans la deuxième partie, la modélisation et la simulation numériquement de différents éléments de la chaîne de conversion hybride en utilisant le logiciel Matlab.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord commencé par le générateur éolien qui présente une caractéristique non linéaire et nécessite un contrôleur MPPT pour extraire le maximum de puissance produite par le système de conversion d'énergie hybride. La commande vectorielle a été appliquée à la génératrice à aimant permanent. Parler sur la technique de recherche de MPP (OTC). Affiché les résultats de simulations de chaque élément des chaînes de conversion éolienne avec batteries et la pile à combustible (système hybride).

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté un système hybride à d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à un système de stockage. Nous avons ainsi donné dans un premier temps une présentation de gestion d'énergie et cette algorithmique à pour but de déterminer les points de fonctionnement des sources du système hybride dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable.

Pour valider en simulation cette stratégie de gestion, nous avons considéré quelques scénarios de simulation que le système hybride est amené à faire. Puis, les résultats des différents scénarios réalisés sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

La production d'électricité par le système hybride (éolien) avec un système de stockage répond bien au problème posé par le contexte énergétique actuel.

## *Références bibliographiques*

---

- [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 en électrotechnique, Université Bejaia, Algérie, 2012.
- [3] A. Imane « Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairage) sur le rendement d'une cellule solaire », Mémoire de Master en physique, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, 2019.
- [4] 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.
- [5] A. Kenza « La Modélisation et la simulation d'une éolienne à basse d'une machine asynchrone doublement alimentée », mémoire de licence, Université Akli Mohand Oulhadj, 2018.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] I. Tegani « Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des atteries, une éolienne et une source photovoltaïque » Thèse Doctorat LMD, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2016.
- [10] P. Thounthong « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super-condensateurs » Thèse Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [11] E.M.Natsheh « Hybrid Power Systems Energy Management Based on Artificial Intelligence » Thèse Doctorat, Université Manchester Métropolitain, France, July 2013.

## *Références bibliographiques*

---

- [12] I. Vechiu « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre, France, 2005.
- [13] M. Sadaoui, M. Meddouri « Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque-Eolien) » Mémoire de Master en électrotechnique, Université Bejaia, Algérie, 2012.
- [14] O. GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » École Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [15] L. Chan « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne ». IEEE Canadian Review Summer, Été 2002, pp. 1-5.
- [16] Hartwanger, D., Horvat, A., « 3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD », NAFEMS UK conference 2008, Engineering Simulation : Effective Use and Best Practice, Cheltenham, UK, June 10-11, 2008, Proceedings.
- [17] Gorban' A.N., Gorlov A.M., Silantyev V.M., « Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow », Journal of Energy Resources Technology - Décembre 2001 - Volume 123, Issue 4, pp. 311-317.
- [18] B. Boukhezzer « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable » Université Paris XI, France. Thèse N°8212 (2006),
- [19] E. Muljadi, C.P. Buterfield « Pitch controlled variable speed wind turbine generation », IEEE industry applications, society annual meeting, Phoenix, Arizona, 2-7 October 1999.
- [20] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride », thèse doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2009.
- [21] 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.
- [22] 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.

## *Références bibliographiques*

---

- [23] M. Larbi, A. Farouk « Implémentation d'un algorithme de gestion d'énergie d'un système hybride (photovoltaïque – pile à combustible) dans une FPGA » thèse de master en université de Bechar, Algérie, 2021.
- [24] S. Ait Mahrez, B. Adjeroud « Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC avec stockage d'hydrogène », Mémoire d'ingénieur d'état, Université saad Dahleb, Blida, Algérie, 2020.
- [25] A. Haddad, R. Bouyekhf, A. El Moudni « Modélisation dynamique non linéaire d'une cellule de pile à combustible du type PEM : Effet de l'humidification de la membrane électrolytique », Laboratoire système et Transport, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, France, 2009.
- [26] Yasuhito Hidaka, Koji Kawahara « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Full cell for Operational Strategy in Residential Use », 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012.
- [27] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir, Steven R. Shaw « Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits » IEEE Transactions ON Energy Conversion, Juin 2005.
- [28] 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.
- [29] N. Tlili, B. Neily, F. Ben Salem « Modeling and Simulation of Hybrid System Compling a Photovoltaic Generator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part I) » IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14) 2014.
- [30] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada « Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions », IEE Proc. Generation Transmission Distrib. 142 (1) (1995), pp. 59–64.
- [31] X. Liu, L.A.C. Lopes « An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays », Power Electronics Specialists Conference, 2004, PESC 04. 2004, IEEE 35th Annual vol. 3, 2004, pp. 2005–2010.
- [32] A. T. Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri, France, 2010.

## *Références bibliographiques*

---

- [33] A. Mirecki « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [34] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [35] 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.
- [36] I. Vechiu « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », thèse doctorat en génie électrique, Université du Havre, France, 2005.
- [37] R. Ruas « Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque », thèse doctorat en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.
- [38] M. J. Wu, E. J. Timpson, S. E Watkins « Temperature considerations in solar arrays» IEEE Conference Annual Technical and Leadership Workshop, pp: 1-9, 2 Avril 2004.
- [39] J. Lachaize « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [40] B. Achour « Commande vectorielle du moteur synchrone aimants permanents(MSAP) », thèse de doctorat en génie électrique, Université de Biskra, Algérie .



- Schéma de système éolienne

Schéma de la turbine :

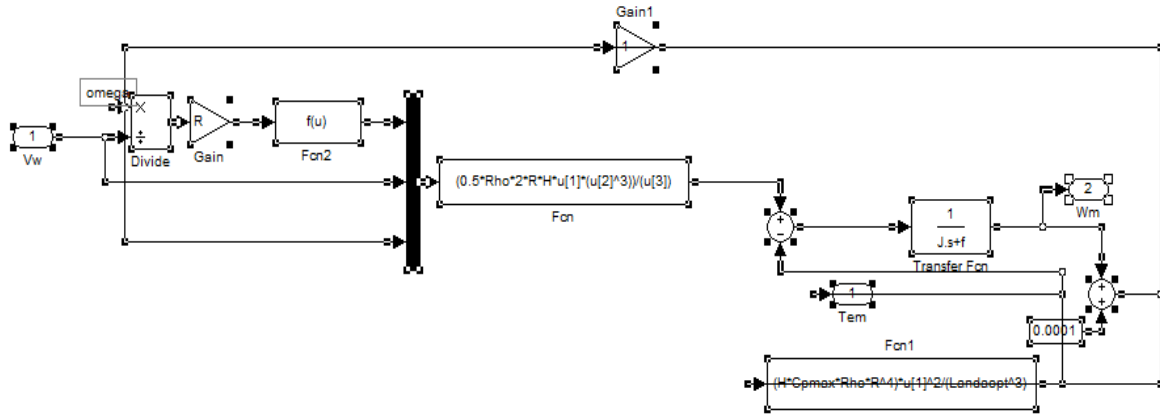
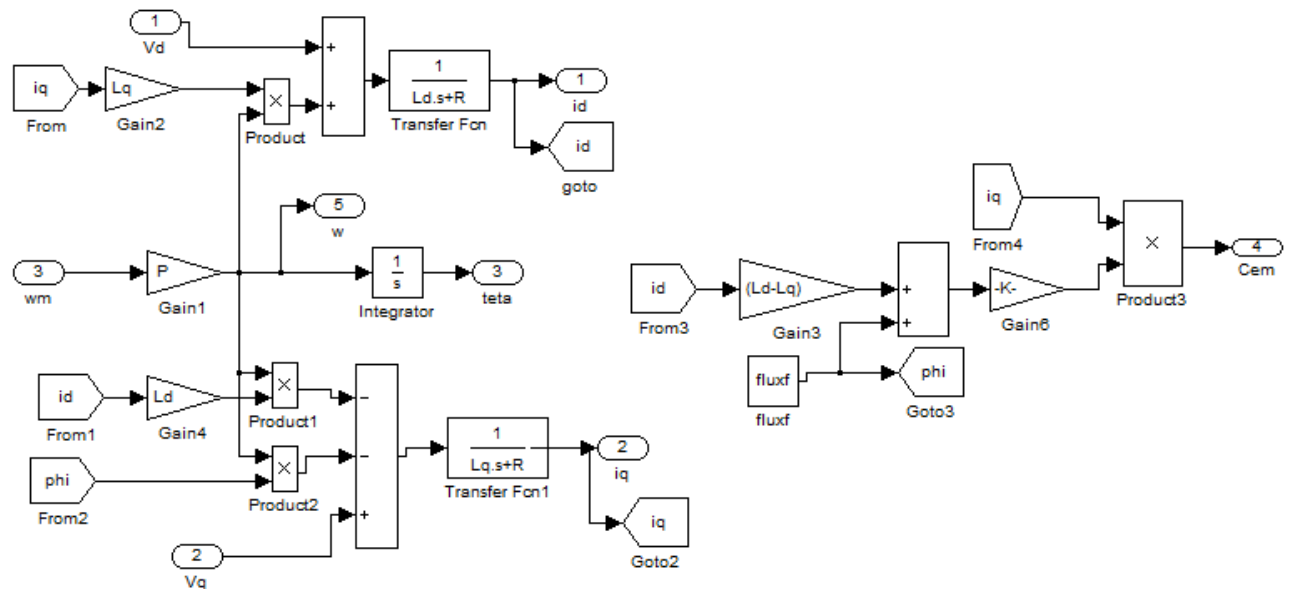
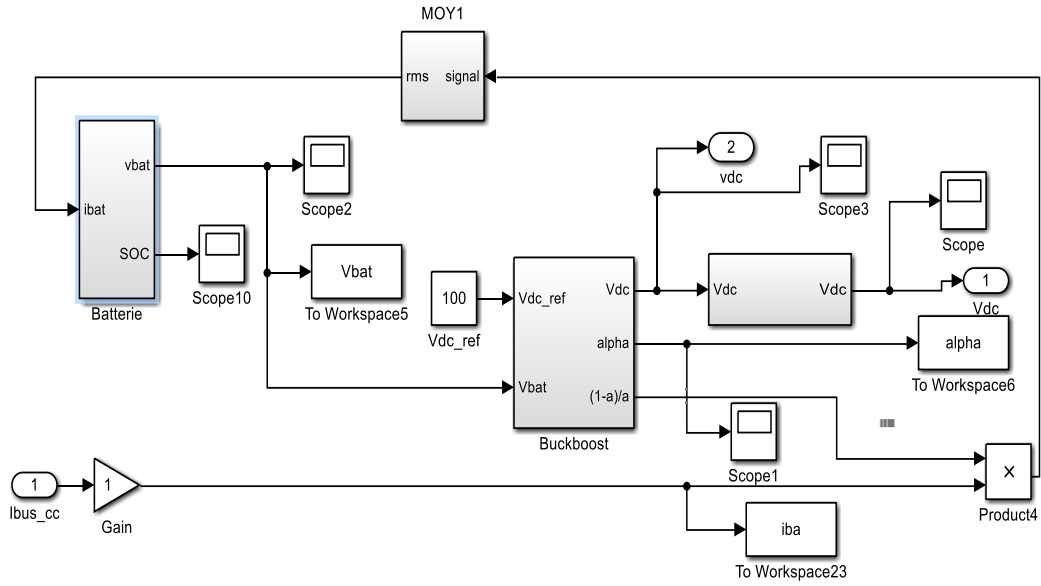


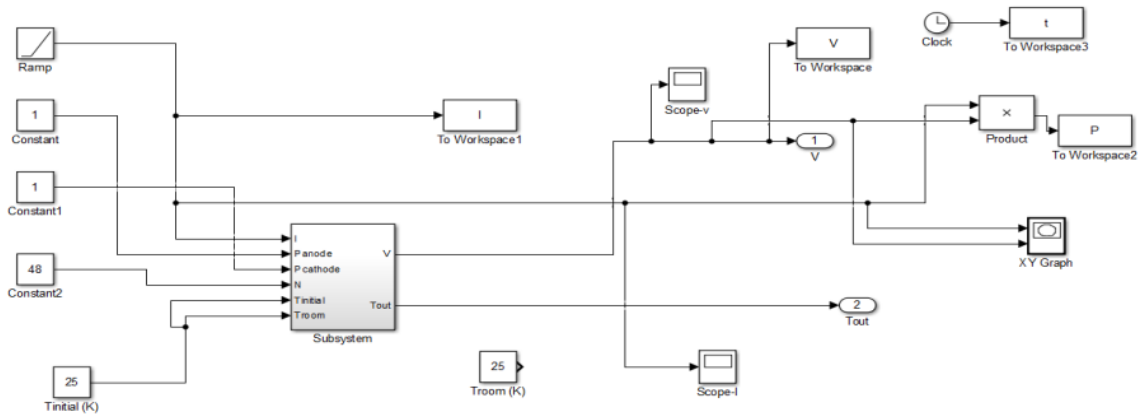
Schéma de la machine GSAP :



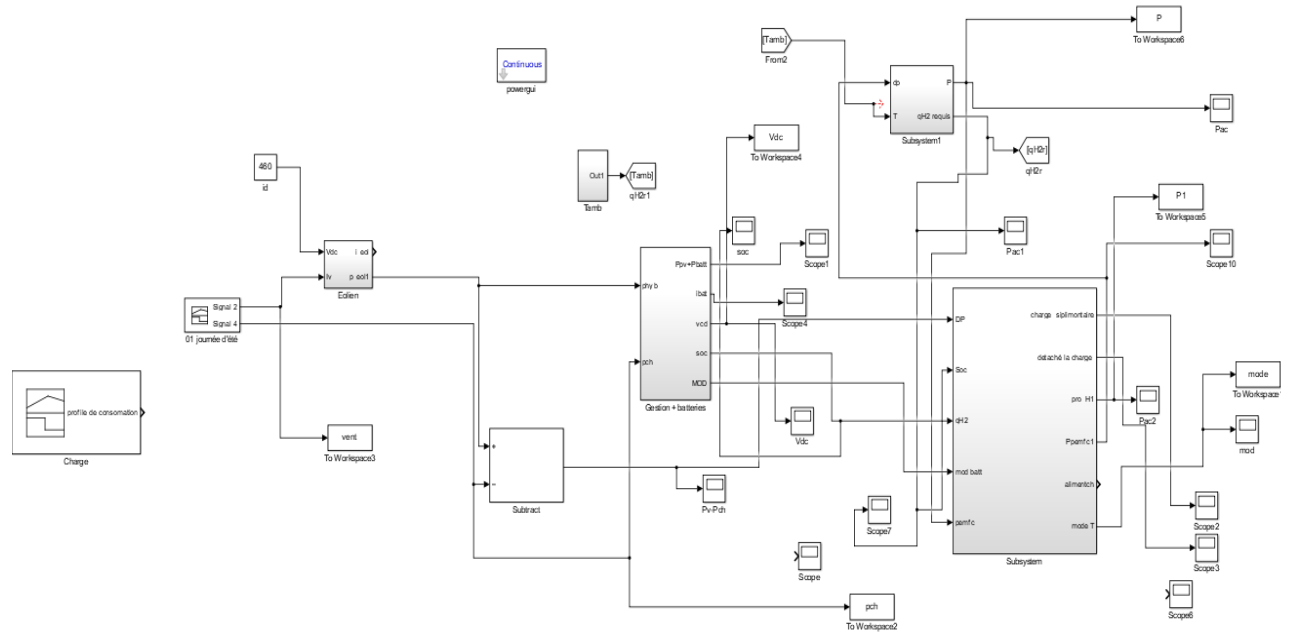
- schéma block de Batterie



- Schéma de la pile à combustible



- schéma de système hybride



- Paramètre de générateur éolien

**Paramètres de la turbine :**

Puissance nominale :  $P_n = 1 \text{ kW}$  .

Rayon de la turbine :  $R_t = 1.05 \text{ m}$  .

Moment d'inertie :  $J = 0.021 \text{ Kg.m}^2$  .

Frottement :  $f = 0$  .

Le gain de multiplicateur  $G = 1$ .

**Caractéristique de la génératrice synchrone à aimant permanent :**

$R_s$	$0.5\Omega$
$L_s$	$0.016\text{ H}$
$L_r$	$0.016\text{ e}^{-3}\text{H}$
Flux	$0.148\text{ Wb}$
P	17

- **Paramètre de la batterie**

Capacité de batterie :  $C_{\text{bat}} = 260\text{Ah}$ .

Tension au borne de la batterie :  $V_{\text{bat}} = 12\text{V}$ .

La résistance interne de la batterie :  $R_s = 4\text{ m}\Omega$ .

## ملخص

يعد استخدام الطاقات المتجددة لإنتاج الطاقة خيارًا واعدًا للطاقة يلبي الطلب المتزايد على الطاقة في العالم ، ولكن نظرًا لطبيعتها العشوائية لا تضمن استمرار العرض. يبدو أن الجمع بين عدة أنواع من المصادر المتجددة (توربينات الرياح ، وخلية الوقود ، وما إلى ذلك) مع بطاريات التخزين هو الحل الأمثل لحل هذه المشكلة. في هذا العمل ، يتم التعامل مع ثلاثة جوانب ، وهي: اختيار التكوين الأنسب ، وتعظيم استخدام المورد المتجددة والتخفيف. في هذا السياق ، يتم عرض النمذجة والمحاكاة لعناصر النظام الهجين المختلفة. لتعظيم استخدام المورد المتجددة ، يتم تقديم خوارزميات MPPT الكلاسيكية من أجل الحصول على أقصى قدر من كفاءة الطاقة. يتكفل المشرف بإدارة الطاقة في مختلف المصادر (الرياح).

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

## Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables pour la production de l'énergie est une option énergétique prometteuse qui répond à la demande croissante en énergie dans le monde, mais vu leurs nature stochastique n'assure pas une alimentation continue. L'association de plusieurs type de sources renouvelables (éolienne, pile à combustible..) avec des batteries de stockage parait la solution idéal pour résoudre ce problème. Dans ce travail Trois aspects sont traités à savoir : le choix de la configuration la plus adaptée, la maximisation de l'utilisation une ressource renouvelable et le dimensionnement. Dans ce contexte une modélisation et simulation de différents éléments de système hybride sont présentées. Pour maximiser l'utilisation une ressource renouvelable des algorithmes MPPT classique est introduit en vue d'obtenir un rendement énergétique maximal. La gestion d'énergie des différentes sources (éolienne) est assurée par un superviseur.

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

## Abstract

The use of renewable energies for the production of energy is a promising energy option that meets the growing energy demand in the world, but due to their stochastic nature does not ensure a continuous supply. The combination of several types of renewable sources (wind turbine, fuel cell, etc.) with storage batteries seems the ideal solution to solve this problem. In this work, three aspects are treated, namely: the choice of the most suitable configuration, the maximization of the use of the three renewable resources and the sizing. In this context, modeling and simulation of different hybrid system elements are presented. To maximize the use of the two renewable resources, classical and advanced MPPT algorithms are introduced and compared with each other in order to obtain maximum energy efficiency. The energy management of the various sources (wind) is ensured by a supervisor.

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