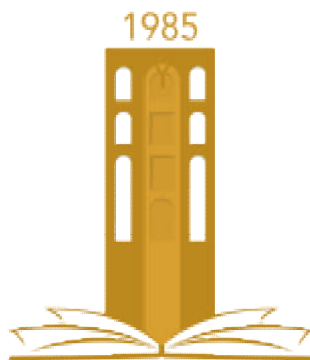


République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed BOUDIAF-M'sila



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

## **Polycopie de Cours**

Spécialité : Master

Energie renouvelable

Intitulé :

**Systemes multi sources à énergies renouvelables**

Par le Docteur : Riyadh ROUABHI

M'sila 2021

## *Auteur*

Dr: ROUABHI Riyadh

riyadh.rouabhi@univ-msila.dz

riyadhrouabhi@gmail.com

riyadhrouabhi@yahoo.fr

Faculté/Institut : Faculté de Technologie

Département : Génie Electrique

Etablissement : Université Mohamed BOUDIAF de M'sila – Algérie

Intitulé de la matière : **Systèmes multi sources à énergies renouvelables**

Semestre : 5

Unité d'Enseignement Fondamentale Code: **UEf2.1.2**

Nombre d'heures d'enseignement Cours : **1,5** H TD : **1,5** H TP : ----

Nombre d'heures de travail personnel pour l'étudiant : **3,00**

Nombre de crédits : **4** Coefficient de la Matière : **2**

## *Description du cours*

La consommation et le besoin d'énergie électrique sont en nette croissance dans le monde, l'épuisement progressif des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon...) caractérisées par des émissions du gaz carbonique produit lors de leurs combustions d'une part, et le risque des centrales nucléaires (les radiations d'uranium) avec une production de déchets radioactifs difficiles à traiter d'autre part, sont des problèmes bien réels qui ont poussés les chercheurs à développer d'autres sources d'énergies durables et plus respectueuses de l'environnement. Ces moyens de substitutions dont on parle, sont bien sûr les « énergies renouvelables(ER) ».

Plusieurs pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.

Les énergies renouvelables, en pleine expansion, sont l'un des éléments clés du développement soutenable d'aujourd'hui. Ils offrent la possibilité de produire de l'électricité propre. Parmi les énergies renouvelables, on compte principalement les énergies : hydraulique, solaire thermique, photovoltaïque, éolienne, ainsi que la biomasse et la géothermie.

Afin de résoudre le problème des sources d'énergie renouvelables (la puissance obtenue à partir de ces sources est variable, elle est tributaire aux conditions climatiques), un couplage entre les différentes sources d'approvisionnement pour former un système dit système d'énergie hybride.

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les sources d'ER, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue.

Le but de l'enseignement de **Systèmes multi sources à énergies renouvelables** est l'étude d'une manière générale de différentes configurations et architectures de ces systèmes électriques et leurs sources d'énergie composites de ses systèmes. Ensuite, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïque-éolien-pile à combustible-électrolyseur avec le système de stockage.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les sources d'énergie conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies. En suite un état de l'art sur les systèmes d'énergie hybride autonome (systèmes multi sources) où nous présentons les définitions, des différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes.

Dans le deuxième chapitre nous donnons une étude descriptive des sources d'énergie qui composent les systèmes d'énergie hybride autonome. En suite connaître la méthode correcte pour le dimensionnement de ces sources et leurs convertisseurs pour reliés à un bus continu, et en fin présenter ses avantages et ses inconvénients.

Le troisième et le quatrième chapitre seront consacré à la modélisation qui décrit le comportement des différentes parties de notre système d'énergie hybride autonome, en suite présenter le système de supervision pour une gestion de l'énergie du système global. Nous terminons ce chapitre par les résultats de simulation du comportement de SEH, face aux variations climatiques et de la charge électrique. Les séries des travaux pratiques (TD ; TP) se trouvent à la fin de chaque chapitre.

**Mot clés:** énergie, Systèmes multi sources, systèmes d'énergie hybride, renouvelable, non renouvelable, modélisation, système de supervision.

### *Public Cible*

Ce cours est destiné aux étudiants de la **2eme année master (Energie renouvelable)** de l'université Mohamed Boudiaf de M'sila– Algérie.

### *Objectifs de l'enseignement*

Ce cours vise à doter les étudiants des connaissances et compétences requises pour les rendre capable de :

- Comprendre une idée générale sur les sources conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies ;
- Connaître les principes de base de fonctionnement des centrales de production d'énergie électrique conventionnelles et non conventionnelles ;
- Présenter un rappel théorique sur les systèmes d'énergie hybride, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés ;
- Présenter l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable. En suite nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïques(PV) ; éolien ; Pile à Combustible (PàC) ; batterie ; électrolyseur ;
- Présenter la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable (système multi-sources autonomes)
- Présenter le système de supervision du système hybride à énergie renouvelable constitué par les algorithmes MPPT appliquée sur le générateur photovoltaïque et éolien et les différentes stratégies de gestion proposée de gestion d'énergie.
- Apprendre l'utilisation des logiciels de simulation à savoir : Homer ; Matlab ;

**Mode d'évaluation :** L'évaluation de l'étudiant se fait par :

1 / Examen de fin de semestre (60%): 2 heures et celui du rattrapage : 2 heures.

Travaux dirigés			Exposés		
Assiduité	Interro	Participation	Interro	Ecrit	oral
/04 pts	/04 pts	/12 pts	/10 pts	/10 pts	/10 pts

2 / Contrôles continus (40%).

# CHAPITRE III

**Systeme multi sources avec  
stockage hybride (batteries/supra  
-condensateurs).**

CHAPITRE III : SYSTEME MULTI SOURCES AVEC STOCKAGE HYBRIDE (BATTERIES/SUPRA CONDENSATEURS).	
III.1	GENERALITES SUR LES SUPERCONDENSATEURS..... 40
III.1.1	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ..... 40
III.1.2	ELEMENTS CONSTITUTIFS DES SUPERCONDENSATEURS ..... 41
III.1.3	DIVERS TYPES DE SUPERCONDENSATEURS ..... 41
III.1.4	APPLICATIONS ..... 42
III.1.5	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES SUPERCONDENSATEURS PAR RAPPORT AUX BATTERIES DANS UN SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE..... 42
III.1.5.1	AVANTAGES DES SUPERCONDENSATEURS PAR RAPPORT AUX BATTERIES ..... 42
III.1.5.2	INCONVENIENTS DES SUPERCONDENSATEURS PAR RAPPORT AUX BATTERIES ..... 42
III.2	DEFINITION DE L'HYBRIDATION DE STOCKAGE ..... 43
III.3	MODELISATION DES SOURCES ET UNITES DE STOCKAGE ..... 43
III.3.1	MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN ..... 44
III.3.1.1	MODELISATION DE LA MACHINE (MADA)..... 44
III.3.1.2	MODELISATION DE LA TURBINE..... 48
III.3.2	MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ..... 52
III.3.3	MODELISATION DU SYSTEME DE STOCKAGE ..... 55
III.3.4	MODELISATION DU BUS CONTINU ..... 56
III.4	SERIE N° 03(EXERCICES SUR LOGICIELS DE SIMULATION : HOMER ; MATLAB) .....XX

### Objectifs de ce chapitre

L'objectif principal de ce chapitre sont présenter en premièrement d'une façon plus détaillée l'état de l'art des **supercondensateurs**. Ensuite la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable (système multi-sources autonomes) constitué par les éléments : **générateur photovoltaïque ; générateur éolien ; système de stockage ; bus continu**, Afin d'atteindre l'objectif principal fixé, différents sous objectifs sont définis comme suit :

- ✓ Comprendre une idée générale sur **le supercondensateur** à savoir : son principe de fonctionnement, Eléments constitutifs, les différents types de ce dispositif, et leurs applications. En fin présenter ses avantages et ses inconvénients par rapport aux batteries dans un système de stockage d'énergie.
- ✓ Modélisation de **la turbine éolienne** pour la synthèse des lois de commandes pour contrôler la capture de la puissance à une valeur maximale en dessous de la puissance nominale dans le quatrième chapitre.
- ✓ Modélisation de **la machine asynchrone à double alimentation (MADA)** dans un fonctionnement génératrice.
- ✓ Modélisation du **générateur photovoltaïque** pour la synthèse une loi de commande (MPPT) pour contrôler la capture de la puissance à une valeur maximale dans le quatrième chapitre.
- ✓ Modélisation du **système de stockage** modèle de batterie du type plomb acide.
- ✓ Et en fin présenter la modélisation du **bus continu** pour la synthèse une loi de commande qu'est fixer la tension du bus continu à une valeur de référence.

### III.1 Généralités sur les supercondensateurs

Le principe de la double couche électrique est découvert par le physicien Hermann von Helmholtz dans l'année 1853. Il remarque que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement des ions de cet électrolyte à la surface de cette interface. Pour des raisons technologiques, il a fallu attendre 100 ans pour que les condensateurs à double couche électrique voient le jour, soit vers la fin des années 1950. L'idée était alors de renouveler les systèmes de stockage d'énergie. Les industriels et les scientifiques, par les progrès qu'ils apportent aux matériaux des électrodes et de l'électrolyte depuis ces 30 dernières années, ont permis de créer le supercondensateur s'imposant aujourd'hui de plus en plus dans les systèmes de forte puissance. Un supercondensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide [Bel01] [ZAN10].

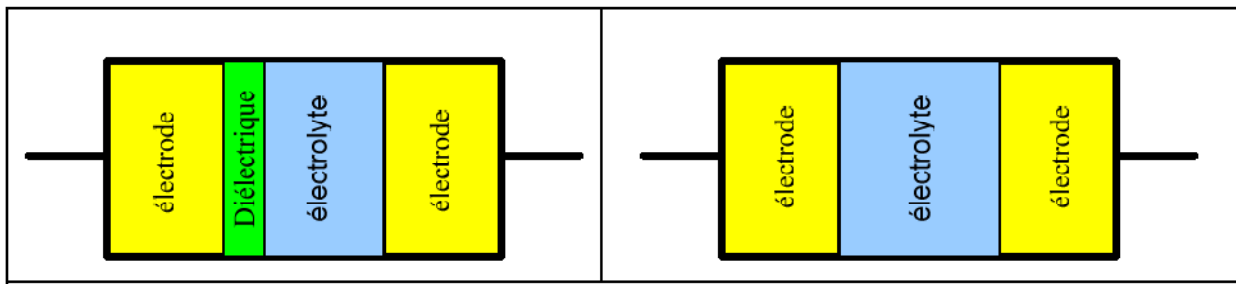


Figure III-1 : Convertisseur Différence entre un condensateur classique (à gauche) et un supercondensateur (à droite) [Bel01] [ZAN10].

#### III.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateurs, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique. Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000 F) [RIZ06]. Ceci fait des supercondensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint, idéalement complémentaires aux batteries ou à la pile à combustible. L'utilisation de structures série parallèle de plusieurs cellules de supercondensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés.

### III.1.2 Éléments constitutifs des supercondensateurs

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

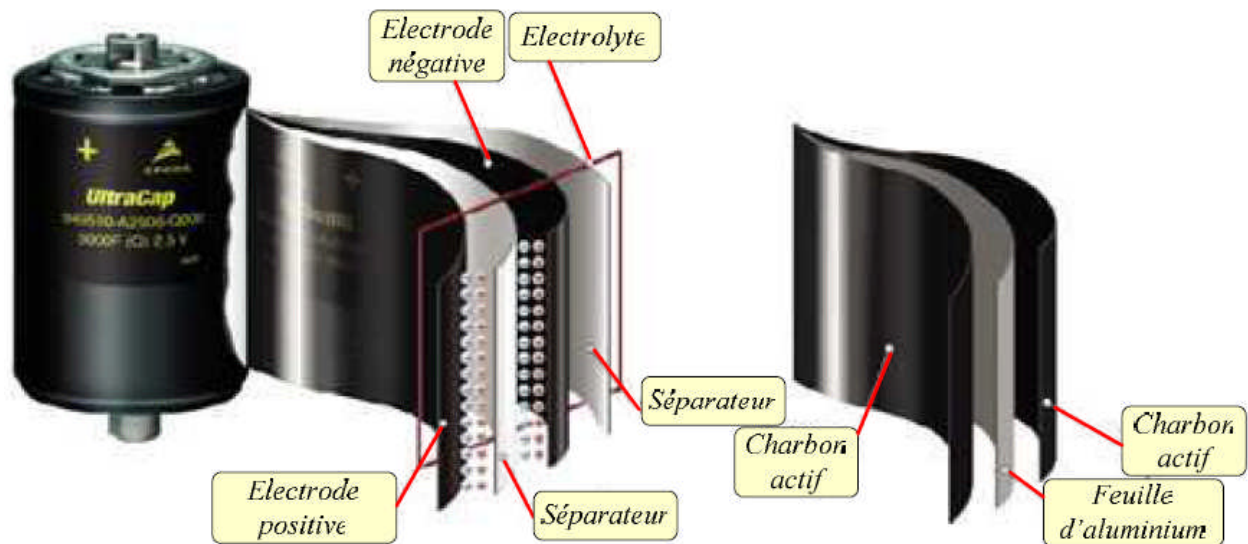


Figure III-2 : Principe d'assemblage des supercondensateurs (à gauche) et des électrodes (à droite),

Il y a trois grandes catégories de matériaux d'électrodes : les charbons actifs, les matériaux métalliques et les polymères conducteurs électroniques. Pour l'électrolyte, on a deux types d'électrolyte : les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse, et les électrolytes organiques, tel que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile [Bel01] [Bel01].

### III.1.3 Divers types de supercondensateurs

Nous distinguerons d'abord deux familles principales [Shu00, Lar09] :

- Les supercondensateurs de type électrostatique, dans lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques ;
- Les supercondensateurs de type électrochimique, dans lesquels interviennent, en plus, des processus faradiques réversibles.

Notons que les supercondensateurs électrochimiques ne doivent pas être confondus avec les condensateurs électrolytiques ou électrochimiques décrits par ailleurs.

- Enfin, même s'ils ne sont cités que pour mémoire, nous évoquerons quelques dispositifs hybrides particuliers, inclassables dans les deux rubriques précédentes par le fait qu'une des électrodes fonctionne comme celle d'un accumulateur ou d'un condensateur électrolytique, alors que l'autre fonctionne comme celle d'un supercondensateur.



### III.1.4 Applications

Historiquement, les supercondensateurs ont, comme on l'a vu dans l'introduction, d'abord été utilisés dans des dispositifs électroniques nécessitant des tensions et des courants de sauvegarde faibles :  $U < 6 \text{ V} ; I < \text{mA}$ .

Ces applications de faible puissance restent majoritaires à ce jour, mais des domaines en forte expansion tels que le véhicule électrique ou les télécommunications sont demandeurs de puissances spécifiques élevées. Des installations hybrides couplant des supercondensateurs avec d'autres moyens de stockage ou de production d'énergie électrique sont en cours de développement. À plus long terme, les supercondensateurs semblent pouvoir atteindre des performances qui leur permettraient de devenir des moyens autonomes de stockage et de fourniture d'énergie électrique dans des installations utilisant l'énergie solaire et/ou éolienne.

### III.1.5 Avantages et inconvénients des supercondensateurs par rapport aux batteries dans un système de stockage d'énergie [Bou10] [Zan10]

#### III.1.5.1 Avantages des supercondensateurs par rapport aux batteries

Par rapport aux batteries, les supercondensateurs présentent les avantages et inconvénients suivants :

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

#### III.1.5.2 Inconvénients des supercondensateurs par rapport aux batteries

En contrepartie, l'utilisation d'un supercondensateur induit les inconvénients suivants :

- ☹ faible densité d'énergie : la densité d'énergie est plus faible que les batteries (10 % à 20 % de celle d'une batterie).
- ☹ nécessité d'un équilibrage de tension : cet équilibrage de tension est exigé si plus de trois supercondensateurs sont reliés en série.
- ☹ composants basses tensions : des mises en série sont nécessaires pour obtenir des tensions plus élevées que les quelques volts d'une cellule élémentaires.
- ☹ prix : le prix des supercondensateurs est plus élevé que celui des batteries.

### III.2 Définition de l'hybridation de stockage

Nous avons vu que la présence d'unités de stockage au sein d'un système de puissance en site isolé était indispensable pour en assurer deux fonctions vitales : l'autonomie à moyen terme du site pendant les périodes où la production est très faible, et l'équilibre énergétique en stockant ou déstockant la différence entre puissance produite et puissance consommée à chaque instant. Le panel des solutions de stockage, peut se classer selon leur énergie et puissance spécifiques, qui permettent d'assurer respectivement la première et la seconde fonction

Pour une utilisation en site isolé par un particulier, nous ne retenons pas les piles à combustible, trop chères, et les volants d'inertie, trop dangereux dans ce contexte. Peu chères et souvent sans entretien, les batteries sont la solution idéale pour assurer l'autonomie énergétique sur plusieurs jours. Cependant, elles présentent une faible puissance spécifique, ce qui amène à se demander ce qui se passe lors de pics de production ou de consommation. Si le pic est dans une gamme de fréquences suffisamment basse, il peut être absorbé par la batterie, engendrant une charge ou décharge à fort courant [Cro13].

Cependant, la durée de vie d'une batterie est tributaire du nombre de ses cycles de charge-décharge, qui à l'usage engendre des phénomènes chimiques irréversibles qui diminuent peu à peu sa capacité. Mais plus le courant utilisée pour la charge ou de décharge est fort, plus elle se dégrade vite. Les pics de puissance sont amenés à se produire très régulièrement, ce qui limite à long terme nettement la durée de vie de la batterie. Si la gamme de fréquences couvertes par les pics est trop grande pour être "visible" par la batterie, alors les capacités internes au système de puissance les absorberont, engendrant saturations et pertes dans le circuit.

De par leur grande puissance spécifique, les supercondensateurs seraient aptes à absorber tous ces pics sans dommage, assurant ainsi efficacement la fonction d'équilibrage énergétique du système. Cependant, ils n'ont pas l'énergie spécifique suffisante pour assurer son autonomie sur plusieurs jours. Ici encore, la solution est donc d'associer les deux technologies pour profiter des avantages de chacune [Cro13].

### III.3 Modélisation des sources et unités de stockage

Pour déterminer une stratégie de gestion adéquate, il faut connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la modélisation et la simulation. Le système proposé dans cette étude est un système hybride multi-source avec le système de stockage, il est constitué par : Un générateur photovoltaïque, un générateur éolien, une supercondensateurs et une batterie.

Dans ce qui suit, nous présentons les modèles mathématiques bien détaillés de chacun de ces différents éléments du système

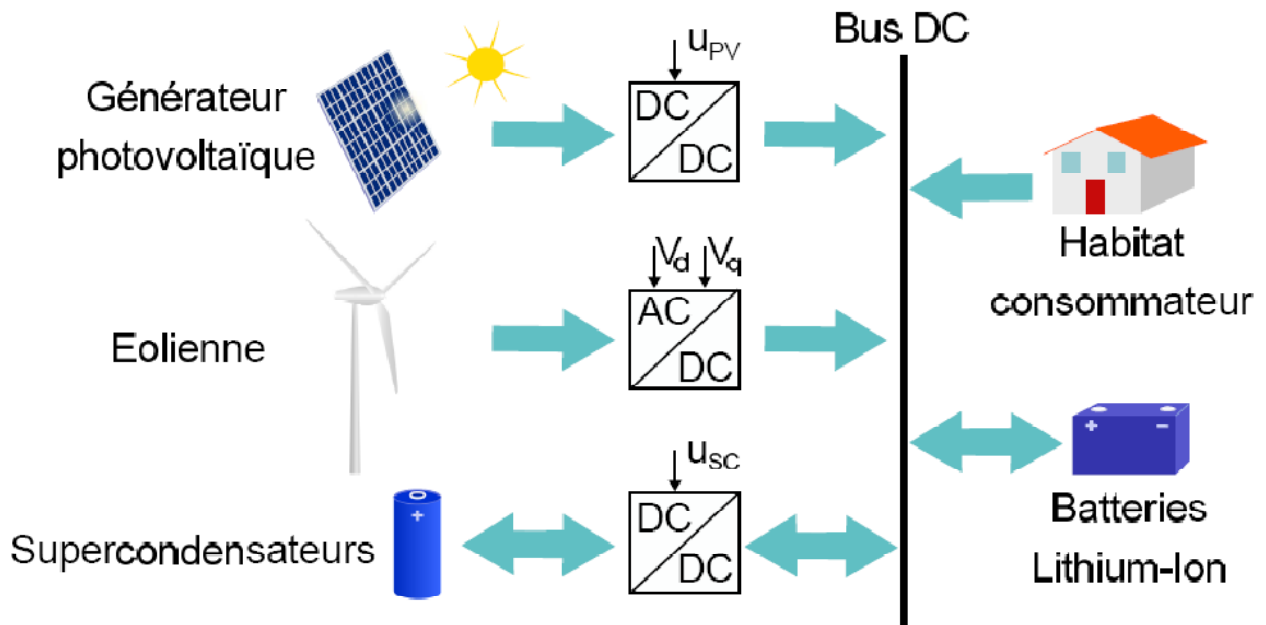


Figure III-3 : Synoptique du système multi-sources multi-stockages en site isolé

### III.3.1 Modélisation du générateur éolien

Le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable composé d'une machine asynchrone à double alimentation, entraînée par une turbine à calage variable et pilotée par le rotor aux moyens de deux convertisseurs de puissance bidirectionnelle fonctionnant en MLI est le système le plus utilisé dans la conversion d'énergie éolienne vu les avantages qu'il apporte.

#### III.3.1.1 Modélisation de la machine (MADA)

La machine asynchrone double alimentation est un système non linéaire très complexe. Une commande performante sur cette machine, pour ses différents régimes de fonctionnement, nécessite une modélisation mathématique plus précise pour représenter son comportement de manière satisfaisante et réelle.

##### ❖ Equations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c)

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la machine asynchrone à double alimentation est une machine classique dont le rotor est accessible et identique au stator. Par conséquent, elle a le même modèle que celui de la machine asynchrone à cage, à l'exception des tensions rotoriques qui ne sont pas nulles

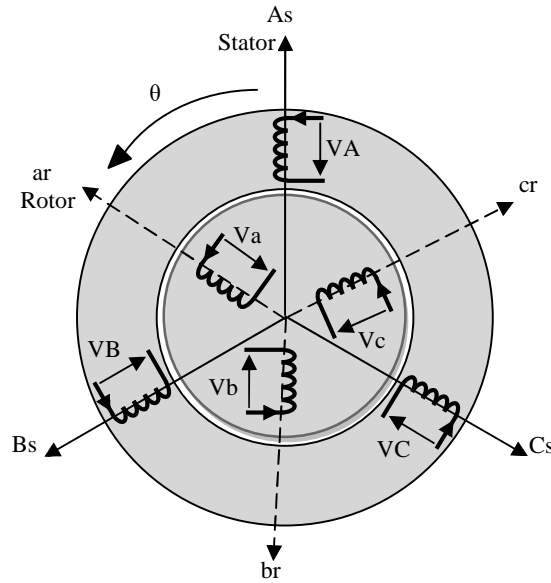


Figure III-4 : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

### Equations électriques

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (II.22)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; & [I_s] &= \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; & [\varphi_s] &= \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; & [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; & [I_r] &= \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; & [\varphi_r] &= \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Où  $R_s$  et  $R_r$  sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

$V_s$ ,  $V_r$  - les tensions simples statoriques et rotoriques.

$I_s$ ,  $I_r$  - les courants de phase statoriques et rotoriques.

$\varphi_s$ ,  $\varphi_r$  - les flux respectivement statoriques et rotoriques.

### Equations magnétiques

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases}$$

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où  $L_{SS}$ ,  $L_{rr}$  sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

$M_s$ ,  $M_r$  - les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

### Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta}$$

Avec :

- $C_{em}$  - le couple électromagnétique de la machine;
- $C_r$  - le couple résistant;
- $f_r$  - le coefficient de frottement visqueux de la MADA;
- $\Omega$  - la vitesse de rotation de l'axe de la MADA;
- $J$  - l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \cdot [I_r]$$

où  $p$  - le nombre de paires de pôles de la MADA.

### Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère  $(a, b, c)$ ) à un système biphasé (repère  $(d, q)$ ), et obtenir un système d'équation à coefficients constants.

### Equations électriques avec transformation de Park

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases}$$

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$ : sont respectivement les tensions directe et en quadrature statoriques et rotoriques;

$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$ : sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques;

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$ : sont respectivement les flux statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système;

$w_s, w_r$ : sont les pulsations statorique et rotorique;

$\theta_s, \theta_r$ : sont les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

### Equations magnétiques avec transformation de Park

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases}$$

Avec :

- $L_r, L_s$  : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine;
- $M$  : l'inductance mutuelle.

### Equation mécanique avec transformation de Park

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd})$$

#### ❖ Modèle d'état de la MADA

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit.

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U]$$

avec :  $[X] = [\varphi_{sd} \ \varphi_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^t$ ;  $[U] = [v_{sd} \ v_{sq} \ v_{rd} \ v_{rq}]^t$ ;

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

$\alpha$  ,  $\beta$  et  $\delta$  sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} ; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} ; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice  $[A]$  comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s \cdot [A_2] + w_r \cdot [A_3]$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

### III.3. 1.2 Modélisation de la turbine

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales identiques de longueur  $R_T$  fixées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse ayant un rapport de transformation  $G$ . Ce multiplicateur entraîne à son tour l'arbre de la génératrice électrique.

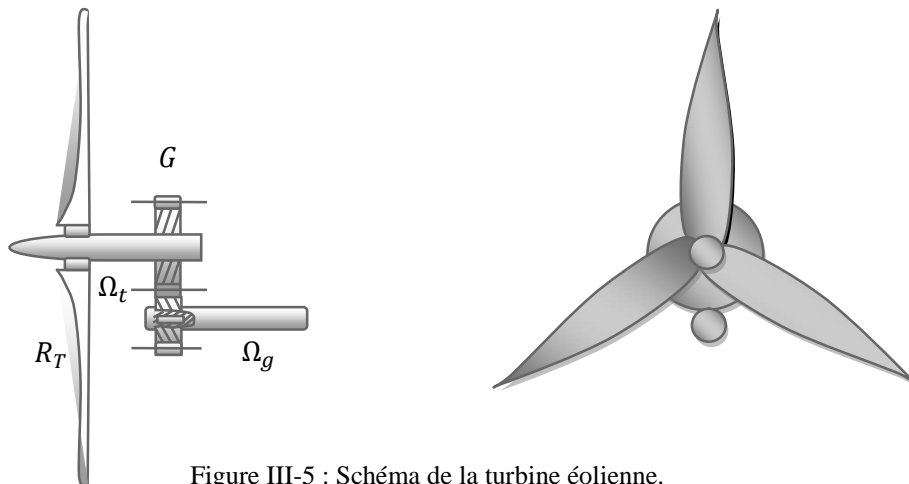


Figure III-5 : Schéma de la turbine éolienne.

Dans notre étude, le profil du vent appliqué possède une faible vitesse  $V = 8$  m/s. Sa variation en fonction du temps est représentée par la figure suivant

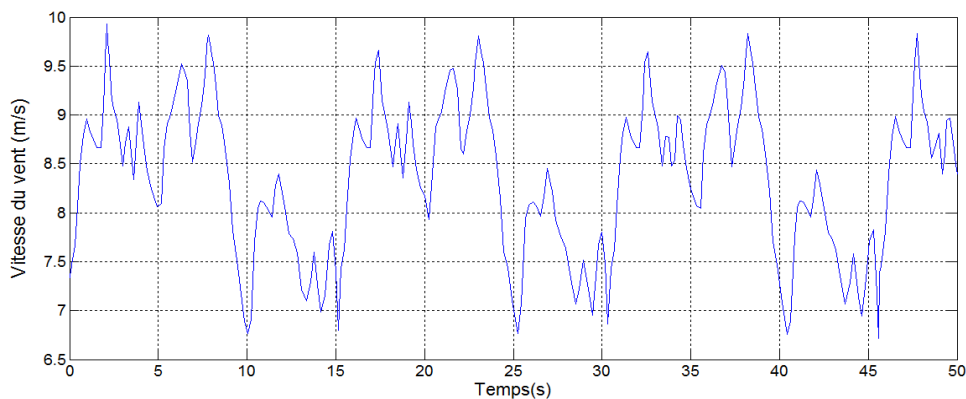


Figure III-6 : Schéma de la turbine éolienne.

❖ Conversion aérodynamique

On suppose que la vitesse  $V$  du vent qui traverse une surface  $S$  est constante. La puissance aérodynamique  $P_{aér}$  est donnée par l'expression suivant:

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3$$

$\rho$  représente la densité de l'air (approximativement  $1.22 \text{ kg/m}^3$  à une pression atmosphérique normale et une température de  $15^\circ\text{C}$ ).

La puissance  $P_T$  de la turbine selon la théorie de Betz est :

$$P_T = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta)$$

$R_T$  - le rayon des pales de la turbine.

$C_p(\lambda, \beta)$  - le rendement aérodynamique de la turbine appelé souvent coefficient de puissance. C'est un coefficient spécifique à chaque éolienne qui dépend de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ .

Dans notre étude, le coefficient de puissance de la turbine utilisé est donné par l'expression suivant:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$$

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , (Figure III-6), permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ( $C_p = 0.5$ ) qui correspond aux valeurs optimales  $\lambda = 9.2$  et  $\beta = 2$ . Avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale.

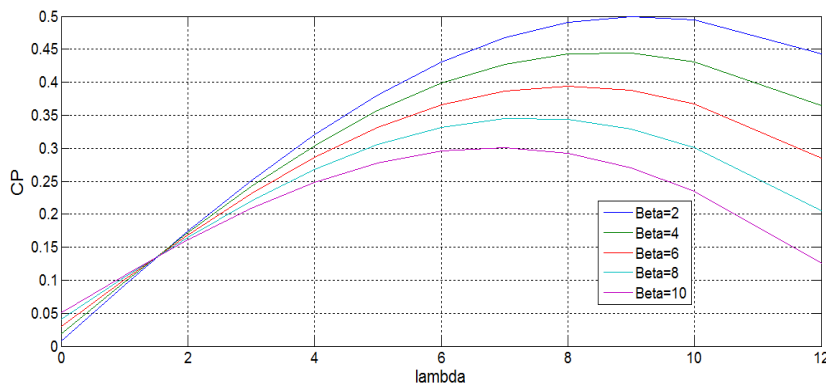


Figure III-7 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.

Une commande adaptée à ce système sera élaborée par la suite pour atteindre ce point de fonctionnement.



Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique)  $\lambda$  qui est le rapport de la vitesse linéaire au bout de la pale de la turbine ramenée à la vitesse du vent, soit:

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V}$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple de la turbine est donc déterminé de la manière suivante :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \right) \cdot \left( \frac{R_T}{V \cdot \lambda} \right)$$

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta)$$

En tenant compte du multiplicateur, adaptateur de la vitesse entre la turbine et la génératrice, son gain est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$G = \frac{C_T}{C_{Mec}} \quad , \quad \text{et} \quad G = \frac{\Omega_g}{\Omega_T}$$

❖ **Equation dynamique de la turbine**

Le train de transmission de la puissance captée par le rotor éolien, est constitué de pales reliées au moyeu couplé à l'arbre lent est relié à son tour à un adaptateur. Cet adaptateur multiplie la vitesse de rotation de l'arbre lent est relié a un arbre rapide qui est relié à son tour à la génératrice.

Le modèle équivalent de masse de cette chaîne qui comprend trois masses à savoir:

- La grande masse du rotor de la turbine éolienne qui représente 90% du moment d'inertie global.
- La masse du multiplicateur qui représente 2 à 4% du moment d'inertie global.
- La masse de générateur qui représente 6 à 8% du moment d'inertie global.

Le modèle est représenté par la suivant.

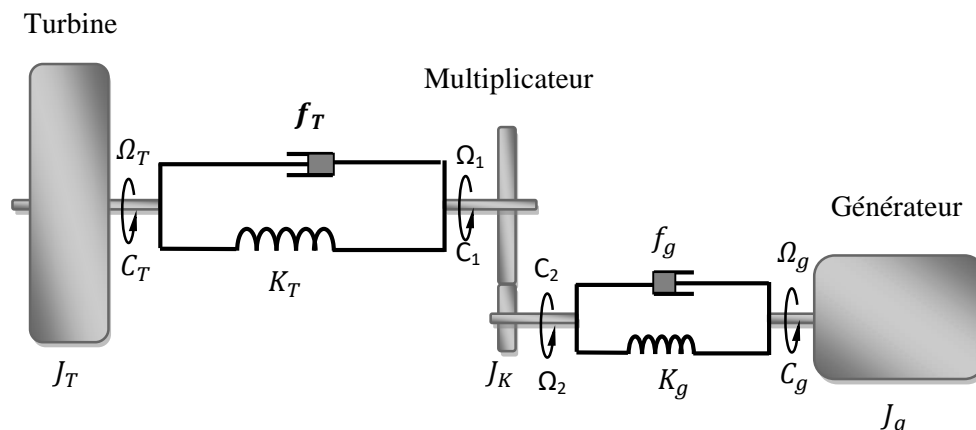


Figure III-8 : Modèle de la turbine.

En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres, nous posons les hypothèses simplificatrices suivantes:

Les trois pales de longueur  $R_T$  chacune, attachée au moyeu sont supposées identiques et ont une seule masse d'une inertie  $J_T$ .

- ✓ L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celles du rotor de la turbine et de la génératrice, ce qui nous permet de la considérer comme un gain de vitesse égal à  $G$  ou un gain de couple égal à  $1/G$ .
- ✓ les arbres de transmissions lent et rapide sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses nous permettent de représenter le modèle à deux masses simplifiées comme suit:

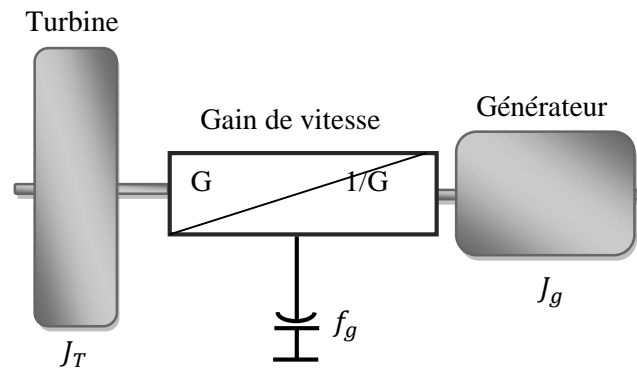


Figure III-9 : Modèle simplifié de la turbine.

Les équations mathématiques des paramètres physiques de ce modèle simplifié sont:

$$C_{Mec} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g\right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g\right) \cdot \Omega_g$$

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g\right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g\right) \cdot \Omega_g \quad (III. 1)$$

Ou

$C_T, C_{Mec}, C_g$  sont respectivement : le couple de la turbine, le couple mécanique issu du multiplicateur et le couple électromagnétique généré par la génératrice;

$J_T, J_g$  - l'inertie de la turbine et celle du générateur;

$f_T, f_g$  - les coefficients des frottements visqueux respectivement de la turbine et de la génératrice;

$G$  - le rapport du multiplicateur de vitesse;

$\Omega_g$  - la vitesse de rotation de la génératrice (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \qquad \frac{f_T}{G^2} + f_g = f$$

L'équation (III. 1) devient :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g$$

Ainsi, nous pouvons établir le schéma bloc de la turbine, figure suivant :

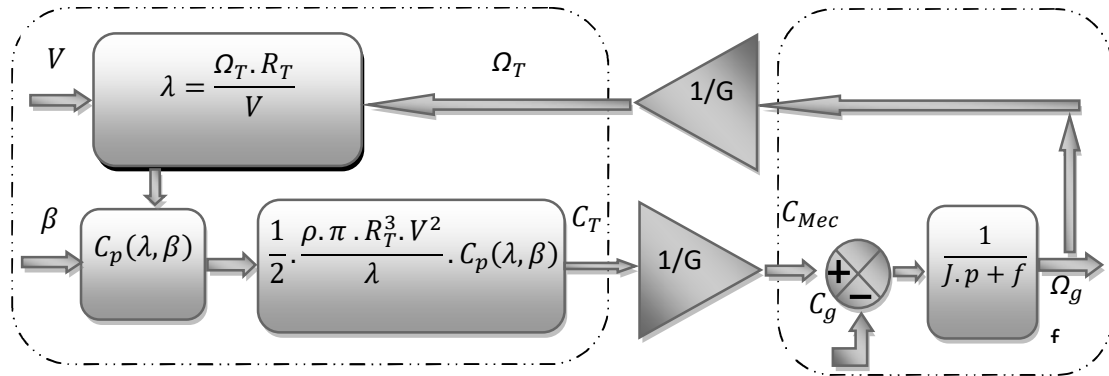


Figure III-10 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

### III.3.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle d'un GPV, il faut tout d'abord retrouver son circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés dans la littérature pour identifier le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque.

Nous avons choisi le modèle à une diode et cinq paramètres, qui sont le plus classique et le plus utilisé. Ce modèle fait intervenir une source de courant qui génère un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'éclairement, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule traversée par le courant  $I_d$ , complété par une résistance série  $R_s$  une autre parallèle  $R_{sh}$  pour les pertes. Comme montrée dans la figure suivant.

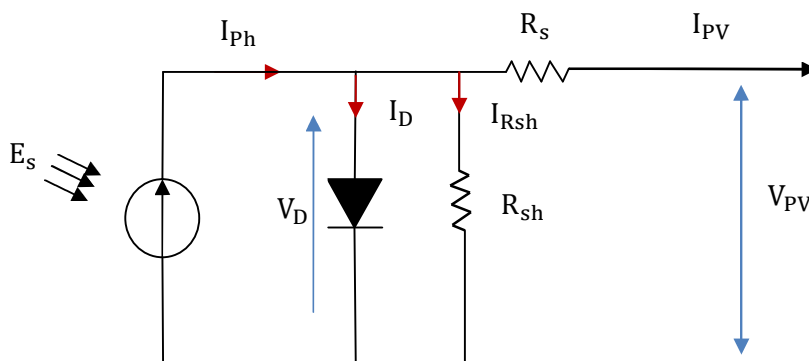


Figure III-11 : Schéma équivalent d'une cellule PV.

D'après la loi de Kirchhoff, le courant délivré par une cellule PV est donné par

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh}$$

$I_{pv}$  : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

$I_{ph}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;

$I_d$ : Le courant circulant dans la diode.

Le courant de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad ; \quad V_t = \frac{NkT}{q}$$

$V_t$ : Tension thermique ;

$N$  : Facteur d'idéalité de la photopile ;

$k$  : Constant de Boltzmann (1,38.10-23J/K) ;

$q$ : Charge de l'électron (1,6.10-19 C).

$$I_0 = I_{sc} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g}{Bk} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]}$$

$I_{sc}$ : Est le courant de court circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence ;

$T$ : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;

$T_n$ : Température de référence des cellules PV [°K] ;

$B$ : Facteur d'idéalité de la jonction ;

$E_g$  : Énergie de gap [ev] ;

$V_d$  : La tension au borne de la diode est donnée par

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv}$$

$R_s$  : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

$V_{pv}$ : La tension de sortie ;

$I_p$  : Le courant circulant dans la résistance  $R_{sh}$  ;

$R_{sh}$ : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

Le courant  $I_{pv}$  devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$

Cette dernière équation va nous permettre de modélisé sous Matlab/Simulink une cellule photovoltaïque puis un générateur PV, qui s'intégrera dans notre système global.

Le module photovoltaïque Isofoton -I\_100 est choisi pour la modélisation puis la simulation. Il contient (72) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 100W. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

<b>Isofoton I-100/12</b>		
Puissance maximale	$P_{mpp}$	100W
Tension de crête maximale	$V_{mpp}$	17.4V
Courant de crête maximale	$I_{mpp}$	5.74
Tension à circuit ouvert	$V_{co}$	21.6V
Courant de court-circuit	$I_{cc}$	3.27A
Tolérance sur puissance de crête		$\pm 5\%$
Température nominale de fonctionnement	NOCT	45°C
Nombre de cellules en série	$N_s$	36
Nombre de cellules en parallèle	$N_p$	2
coefficient de température du court-circuit	$\mu I_{sc}$	0.0023 mA/°C
la résistance série	$R_s$	0.25 $\Omega$
la résistance shunt	$R_{sh}$	110 $\Omega$

**Tableau III.1.** Caractéristiques physiques et électriques du générateur PV.

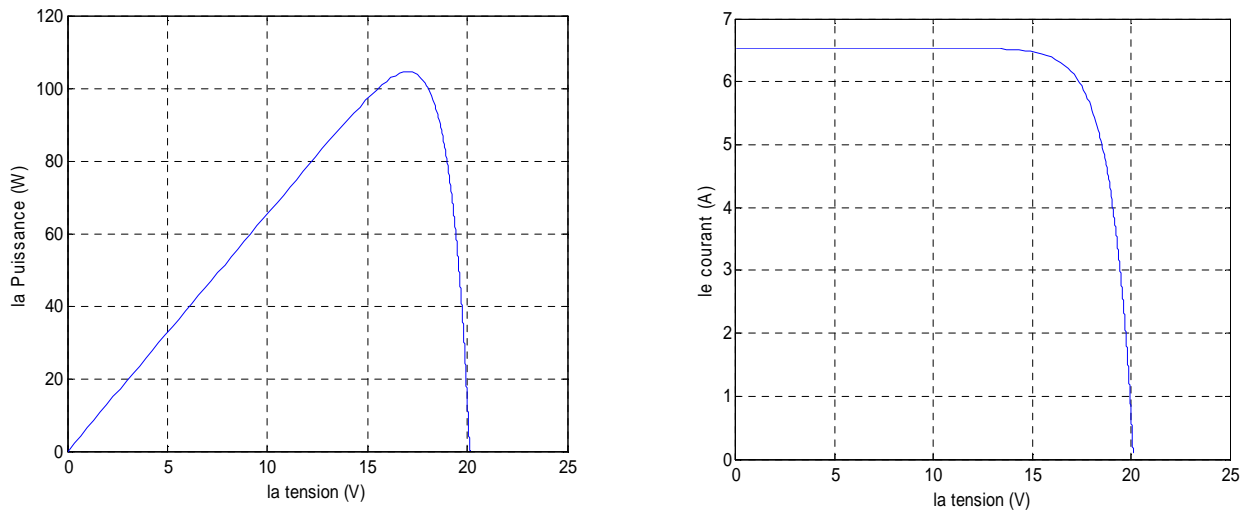


Figure III-12 : Caractéristique P-V et I-V d'un panneau photovoltaïque

**III.3.3 Modélisation du système de stockage**

Dans cette étude, nous avons adopté un modèle de batterie du type plomb acide, construit par une source de tension contrôlée en série avec une résistance constante ( $R_{batt}$ ). Comme illustré à la figure suivant :

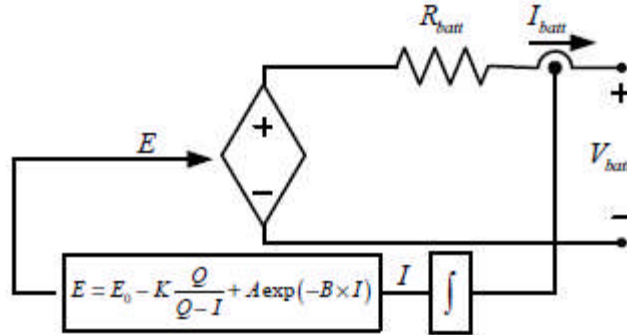


Figure III-13 : Circuit électrique équivalent du modèle de la batterie.

La tension de la batterie ( $V_{batt}$ ) est donnée par la relation :

$$V_{batt} = E - R_{batt} \cdot I_{batt}$$

Où :  $I_{batt}$  : est le courant de la batterie,  $R_{batt}$  : est la résistance interne et  $E$  : est la tension de circuit ouvert de la batterie

Afin d'éviter la dégradation de la batterie et prolonger sa durée de vie, leur état de charge doit être maintenu dans un certain intervalle défini comme suit:

$$SOC(t)_{min} \leq SOC(t) \leq SOC(t)_{max}$$

$SOC(t)_{max}$ : Etat de charge maximale de la batterie et  $SOC(t)_{min}$ : Etat de charge minimale de la batterie

L'état de Charge  $SOC(t)$  de la batterie est exprimée par :

$$SOC(t) = 100(1 - \frac{1}{2aQ} \int Idt)$$

Avec :  $Q$  est capacité nominale de la batterie

**III.3.4 Modélisation du système de stockage**

Généralement dans la modélisation, le bus continu est considéré comme une capacité. Une fois tous les modèles élémentaires sont décrits, nous avons effectué le couplage des sources selon la configuration à bus continu. La puissance fournie par chaque source est centralisée sur le bus à courant continu comme la montre la figure suivant :

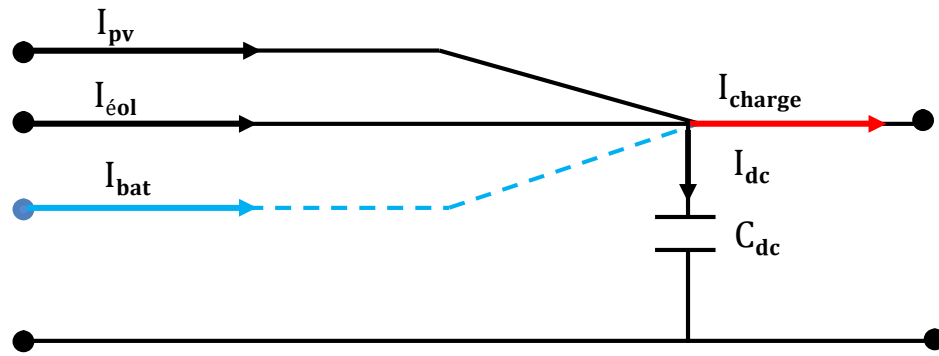


Figure III-14 : Modèle du bus continu.

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt}$$

$$I_{dc} = I_{pv} + I_{éol} \pm I_{batt} - I_{charge}$$

Où :  $I_{pv}$  : est le courant du système photovoltaïque,  $I_{éol}$  : est le courant du système éolien,  $I_{batt}$  : est le courant de charge/décharge de la batterie,  $I_{charge}$  : est le courant de la charge.

#### ❖ Estimation de la valeur de la tension du bus continu

Il est important de fixer la tension du bus continu  $V_{dc}$  à une valeur de référence. Il faut que la tension du bus continu soit supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée côté alternatif de l'onduleur.

Pour un coefficient de réglage maximal ( $m_a = 1$ ), l'expression de  $V_{dc-ref}$  s'écrit :

$$V_{dc-ref} = 2\sqrt{2} V_s$$

Avec  $V_s$  : la valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur ( $V_s = 230 V$ ).

**III.4 Série n° 03 (Exercices sur logiciels de simulation : Homer ; Matlab)**