

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

2 / Contrôles continus (40%).

CHAPITRE II

Exemples de systèmes hybrides à énergie renouvelable.

CHAPITRE II : EXEMPLES DE SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIE RENOUVELABLE.	
II.1	PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE A ENERGIE RENOUVELABLE: PV/EOLIEN/PAC/ BATTERIE 22
II.1.1	ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE 23
II.1.1.1	TYPES DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES 23
II.1.1.2	DIMENSIONNEMENT DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES 24
II.1.1.3	AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UN SYSTEME PV 25
II.1.2	ENERGIE EOLIENNE 26
II.1.2.1	DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES 27
II.1.2.2	AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UN SYSTEME EOLIEN 28
II.1.3	PILE A COMBUSTIBLE (PàC) 29
II.1.3.1	DIFFERENTS TYPES DES P.A.C 30
II.1.3.2	AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE P.A.C 31
II.1.4	ÉLECTROLYSEUR 31
II.1.3.1	TYPES D'ELECTROLYSEURS 32
II.1.5	SYSTEME DE STOCKAGE 32
II.1.5.1	LES BATTERIES 32
II.1.5.2	CARACTERISTIQUES DES BATTERIES 33
II.1.5.3	DIMENSIONNEMENT DU PARC BATTERIES 34
II.1.6	CONVERTISSEURS 34
II.1.6.1	TOPOLOGIES DE CONNEXION DU GPVAU BUS DC 35
II.1.6.1	TOPOLOGIES DE CONNEXION D'EOLIENNE AU BUS DC 35
II.1.6.3	TOPOLOGIES DE CONNEXION DE LA BATTERIE AU BUS DC 35
II.2	SERIE N° 02 36

Objectifs de ce chapitre

L'objectif principal de ce chapitre est présenter l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable (système multi-sources autonomes) Ensuite, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : **PV ; éolien ; PàC ; batterie ; électrolyseur**, Afin d'atteindre l'objectif principal fixé, différents sous objectifs sont définis comme suit :

- ✓ Apprendre une étude descriptive sur les **systèmes photovoltaïque** set les différents types de ces systèmes, en suit connaitre la méthode correcte pour le dimensionnement de cette source, et en fin présenter ses avantages et ses inconvénients.
- ✓ Présenter l'état de l'art de **l'énergie éolienne**, ses avantages et ses inconvénients seront exposés et discutés, en suit un rappel théorique sur les différents types d'aérogénérateurs.
- ✓ Comprendre une idée générale sur **la Pile à Combustible** à savoir: son principe de fonctionnement, les différents types de cette source. En fin présenter ses avantages et ses inconvénients.
- ✓ Présenter la définition **d'électrolyseurs** et son principe de fonctionnement, et en fin présenter ses différents types.
- ✓ Apprendre une étude théorique sur **le Système de stockage** à savoir: les différents types, caractéristiques des batteries, en suite connaitre la méthode correcte pour le dimensionnement de cette source.
- ✓ Apprendre les différentes configurations **des convertisseurs** utilisés dans le système hybride à énergie renouvelable.

II.1 Présentation du système hybride à énergie renouvelable : PV/éolien/PàC/batterie

Dans ce chapitre, nous allons présenter L'architecture complète du système hybride autonome à énergie renouvelable qui est compose : d'un générateur photovoltaïque(GPV), un générateur éolien, une pile à combustible et une batterie. Tous ces composants sont reliés à un bus continu afin d'alimenter une charge DC, une charge AC à travers un onduleur et un électrolyseur.

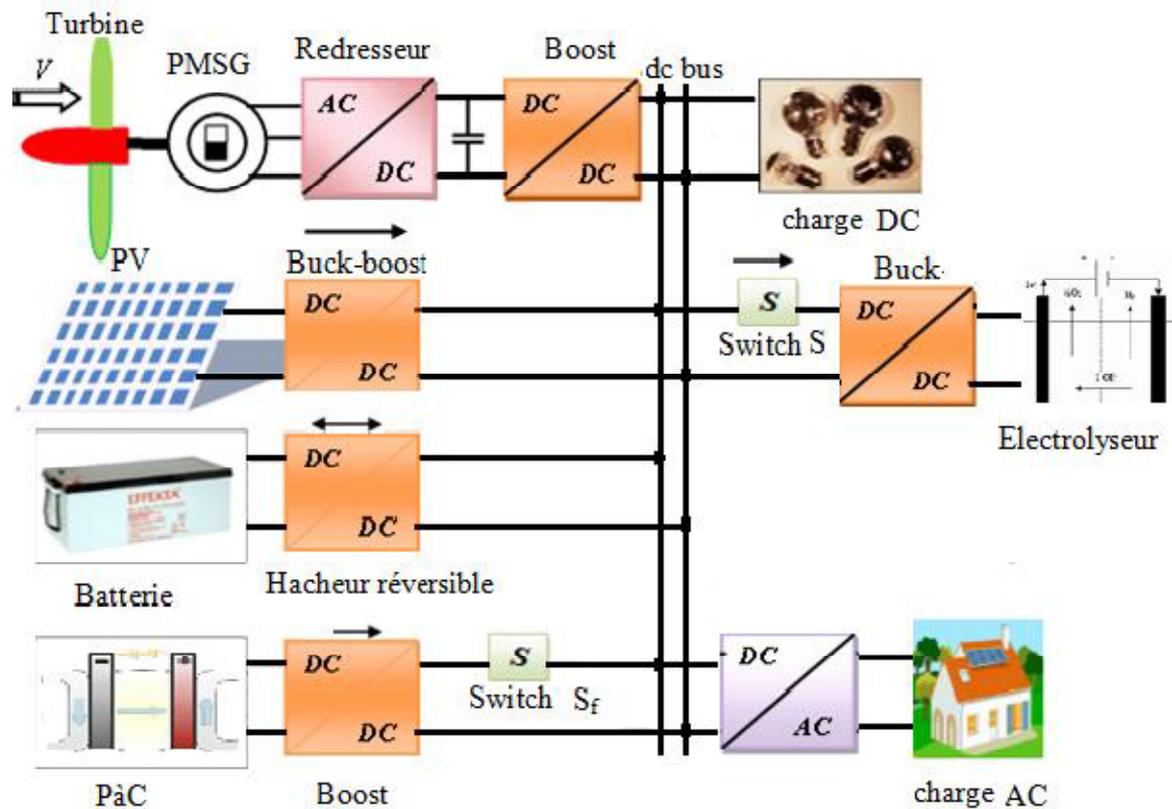


Figure II-1 : Schéma général du système d'énergie hybride.

- ✓ Le système PV se compose de plusieurs panneaux photovoltaïques connectés au bus DC via un hacheur du type buck-boost qui permet d'obtenir le maximum de puissance du GPV grâce à l'utilisation d'un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- ✓ Le système éolien à base d'une machine synchrone à aimants permanents entraînée par une turbine à calage variable des pales qui permet d'obtenir le maximum de puissance de l'éolien grâce à l'utilisation d'un algorithme MPPT, cette machine est pilotée par deux convertisseurs bidirectionnels qui assure la conversion électrique AC/DC et la commande des puissances générées.
- ✓ La pile à combustible est liée au bus DC par un hacheur de type **Boost**.
- ✓ La batterie est reliée au bus DC à travers un convertisseur réversible en courant, il contrôle l'intensité du courant délivré ou consommé par la batterie tout en assurant une adaptation de la tension entre la batterie et le bus DC.

II.1.1 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique de type continu. Une cellule photovoltaïque ou photopile c'est l'unité de base d'un système photovoltaïque, est un composant électronique qui est réalisée à partir de deux couches de silicium. Une couche dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P), ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Comme la montre la figure suivant [Ben15] [Vig10].

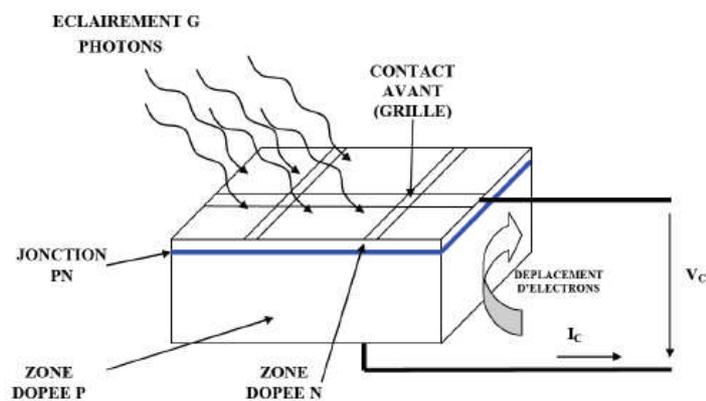


Figure II-2 : Principe de fonctionnement d'une photopile.

II.1.1.1 Types des systèmes photovoltaïques

En fonction du service et des applications recherchés les systèmes photovoltaïques peuvent être classifiés comme suit :

❖ Systèmes PV autonomes :

Ces systèmes fournissent directement l'énergie électrique sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exige des batteries pour stocker l'énergie électrique [Rif09].

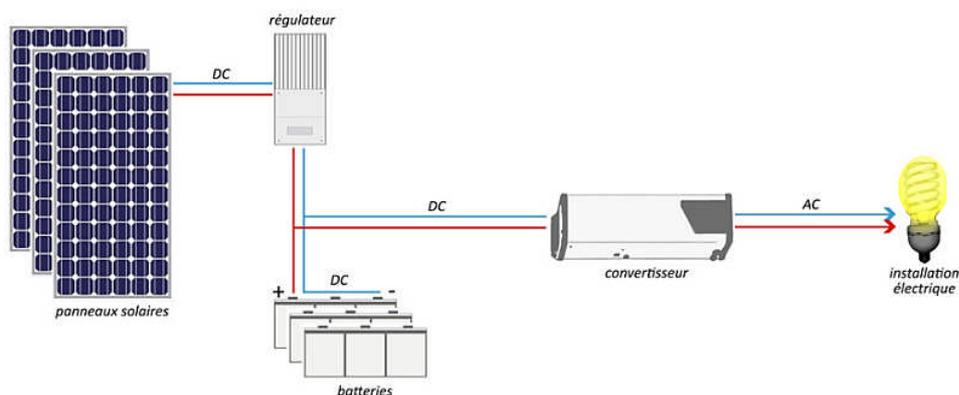


Figure II-3 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome.

❖ Systèmes PV connectés au réseau :

Le champ photovoltaïque est couplé au réseau électrique par des convertisseurs électriques. Ces systèmes peuvent être petits, tels que les systèmes résidentiels ou des grands systèmes comme le cas d'une centrale électrique photovoltaïque [Rif09].

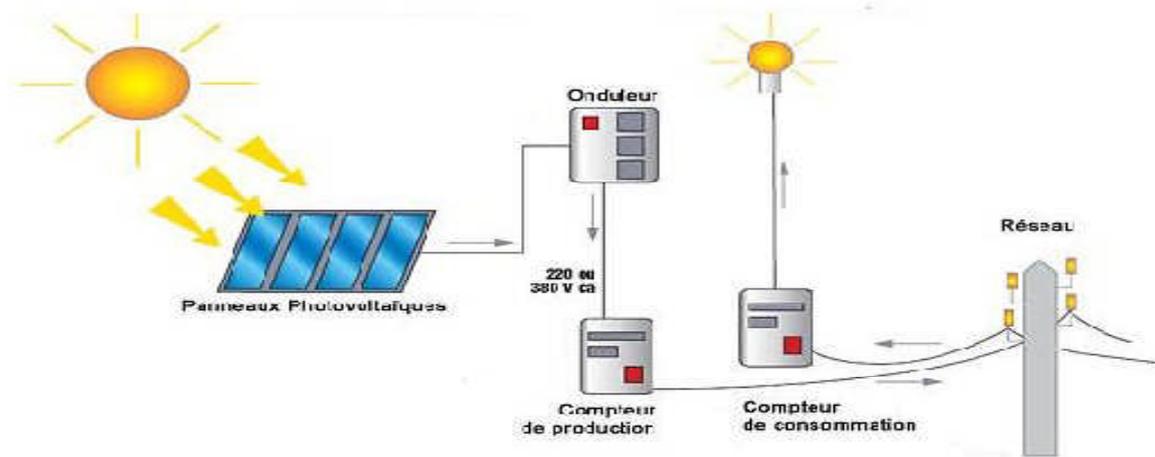


Figure II-4 : Structure d'un système PV connecté au réseau.

II.1.1.2 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

Pour dimensionner la surface de panneaux nécessaires on procède en trois étapes:

Étape 1 : Calcul de l'énergie qui sera consommée par jour (voir bilan des puissances et énergies)

Étape 2 : Calcul de l'énergie à produire, Pour que les besoins du client soit assurés il faut que l'énergie consommée (E_c) égales l'énergie produite (E_p) à un coefficient près.

$$E_p = \frac{E_c}{k}$$

Le coefficient k tient compte des facteurs suivant :

- l'incertitude météorologique ;
- l'inclinaison non corrigé des modules suivant la saison ;
- le point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par : la baisse des caractéristiques des modules, la perte de rendement des module dans le temps (vieillessement et poussières) ;
- le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie (90%) ;
- le rendement du chargeur et de l'onduleur (de 90 à 95%) ;
- les pertes dans les câbles de connexions

Pour les systèmes avec parc batterie, le coefficient k est en général compris entre 0,55 et 0,75. La valeur approchée que l'on utilise pour les systèmes avec batterie sera souvent de 0,65.

Etape 3 : Calcul de la taille du générateur photovoltaïque (ensemble des panneaux) à installer.

La puissance crête des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation. On la calcule en appliquant la formule suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{I_r}$$

E_p : Énergie produite par jour (Wh/j)
 I_r : Irradiation quotidienne moyenne annuelle (kWh/m².jour)

Ce qui revient à écrire

$$P_c = \frac{E_c}{k \cdot I_r}$$

P_c : Puissance crête en Watt crête (Wc)
 E_c : Énergie consommée par jour (Wh/j)
 I_r : Irradiation quotidienne moyenne annuelle (kWh/m².jour)

Concernant l'irradiation moyenne en France et pour la période estivale (ce qui correspond à l'utilisation de cette installation) $I_r = 5$ kWh/m².jour

A partir de la puissance crête des panneaux **BP Solar XX** déterminer le nombre de panneaux solaire nécessaires à l'installation.

$$N = P_c / \text{puissance crête unitaire panneau } N : \text{ le nombre de panneaux}$$

II.1.1.3 Avantages et inconvénients d'un système PV [Zan10]

Le système photovoltaïque a beaucoup d'avantages :

- ☺ Énergie solaire fournissant de l'électricité aux zones rurales les plus isolées ;
- ☺ Énergie solaire inépuisable ;
- ☺ Carburant gratuit;
- ☺ Panneaux solaires demandant très peu d'entretien ;
- ☺ Panneaux solaires silencieux et non dérangeants ;
- ☺ Panneaux solaires recyclables.

Malgré cela, les sources photovoltaïques présentent aussi quelques inconvénients:

- ☹ Les sources photovoltaïques ne fonctionnent pas quand l'énergie solaire n'est pas disponible ;
- ☹ l'installation **PV** nécessite des investissements d'un coût élevé ;
- ☹ Rendement : le rendement de conversion d'un module PV est faible ;
- ☹ l'installation **PV** nécessite une grande surface.
- ☹ Fabrication du module PV qui relève de la haute technologie ;

II.1.2 Energie éolienne

Un aérogénérateur, appelé généralement éolienne, est un dispositif qui capte l'énergie cinétique du vent pour la transformer en une énergie mécanique disponible (mouvement rotatif). Cette énergie est amplifiée par un système d'engrenage (multiplicateur), puis transmise à un arbre de rotation lié à une génératrice qui la convertit à son tour en une énergie électrique. Le schéma des principaux organes du système de conversion éolien est représenté par la figure suivant [LOP08, LAV05] :

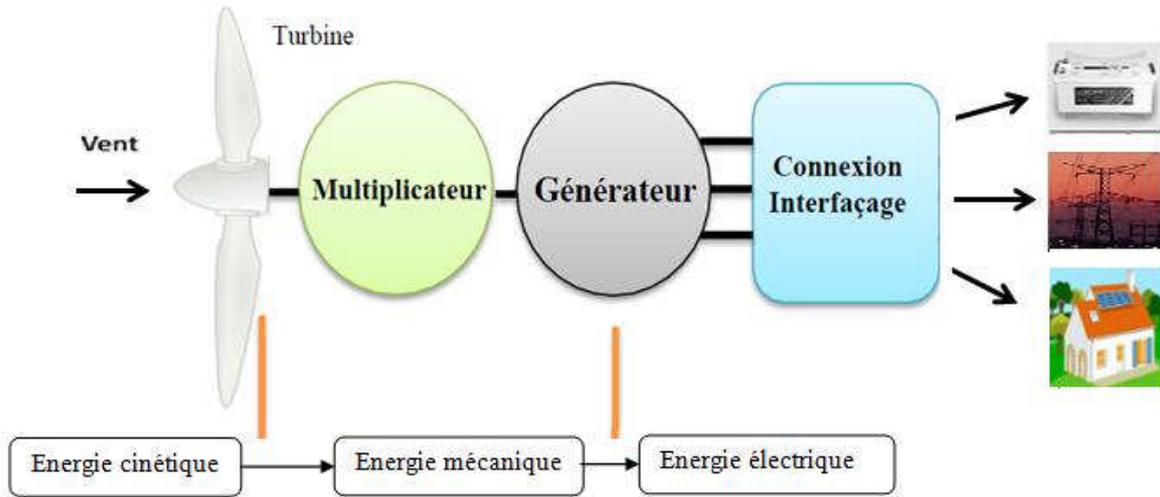


Figure II-5 : Principaux organes du système de conversion éolien.

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale en trois catégories [MUL08]:

- ✓ Eoliennes de petites puissances : $P < 40 \text{ kW}$.
- ✓ Eoliennes de moyennes puissances : $40 \text{ kW} < P < 1 \text{ MW}$.
- ✓ Eoliennes de fortes puissances : $P > 1 \text{ MW}$.

La figure suivant illustre la correspondance taille et puissance des éoliennes.

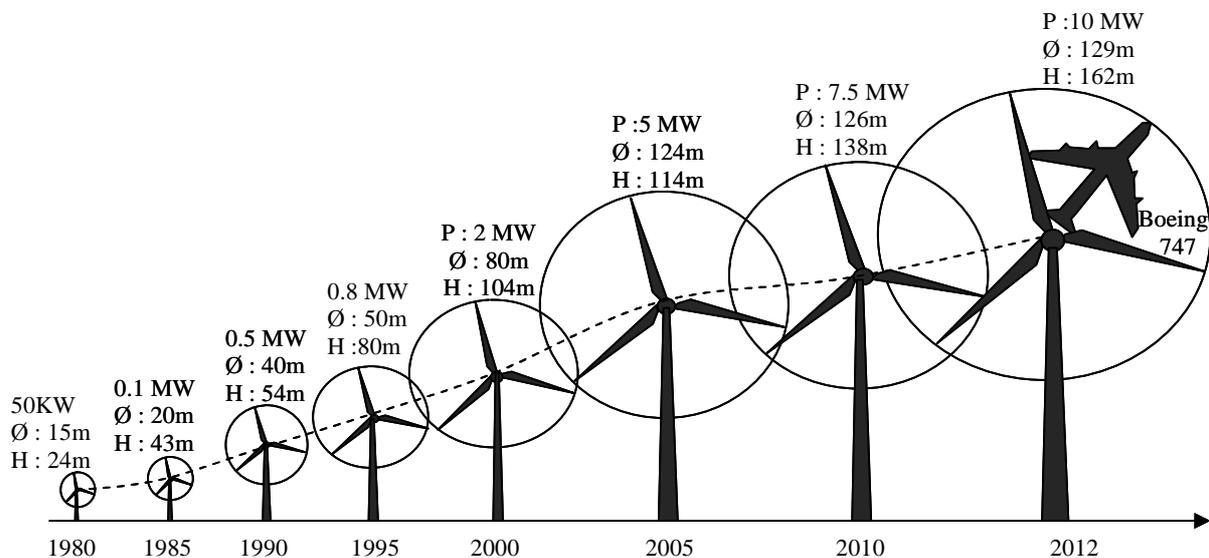


Figure II-6 : Puissance des installations éoliennes (MW) à l'échelle mondiale [GWEC 15].

II.1.2.1 Différents Types D'éoliennes

Plusieurs configurations d'aérogénérateurs sont possibles. Selon la structure d'un système éolien, nous distinguons deux grandes familles : éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal [POI 03, BEL 14].

❖ **Eoliennes à axe vertical**

Ce type d'éoliennes est la première à être utilisé dans la conversion d'énergie éolienne. Leur rotor est monté verticalement par rapport à la terre. Leur fonctionnement est basé sur la poussée axiale du vent et son incidence sur l'arbre du système. Cette catégorie d'éolienne a vu plusieurs prototypes, mais deux seulement ont atteint l'étape d'industrialisation [HAM 13].

• **Turbines de type Savonius.**

Elle est constituée de deux sections semi circulaires cylindriques formant approximativement un S. Le couple moteur est obtenu par une pression exercée par le vent sur les surfaces des deux sections de la structure .Le rotor de Savonius nécessite un grand couple de démarrage [MIR 05].

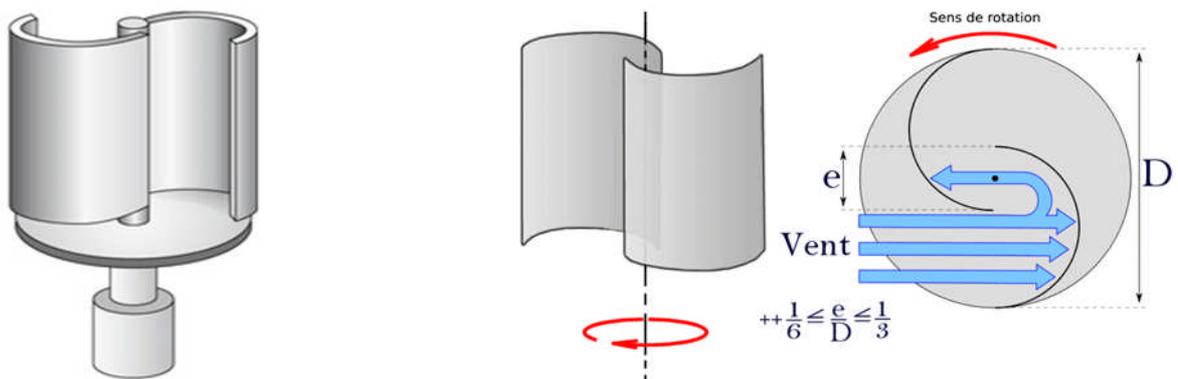


Figure II-7 : Structure de Savonius [ABD 07].

• **Turbines de type Darrieus**

Elle est constituée de plusieurs pales biconvexes, en générale deux ou trois montées symétriquement et liées rigidement entre elles, tournant autour d'un axe vertical. Les formes utilisées pour les surfaces décrites par les pales sont cylindriques, tronconiques ou paraboliques [BOY 06].

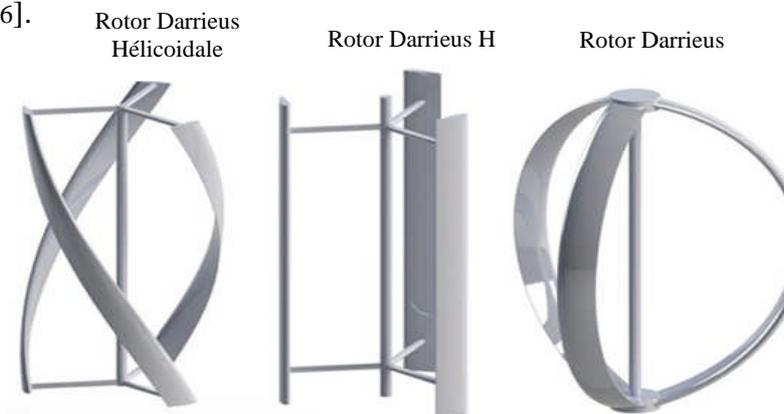


Figure II-8 : Structure de Darrieus [ABD 07].

❖ Eoliennes à axe horizontal

Ce type d'éoliennes est à trois pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Cependant, il existe d'autres structures à une ou deux pales. Les forces aérodynamiques appliquées sur les pales créent un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor de ce dispositif. Suivant leur orientation en fonction du vent, les éoliennes à axe horizontal sont dites en « amont » ou en « aval » [DID 06] [ROG 04].

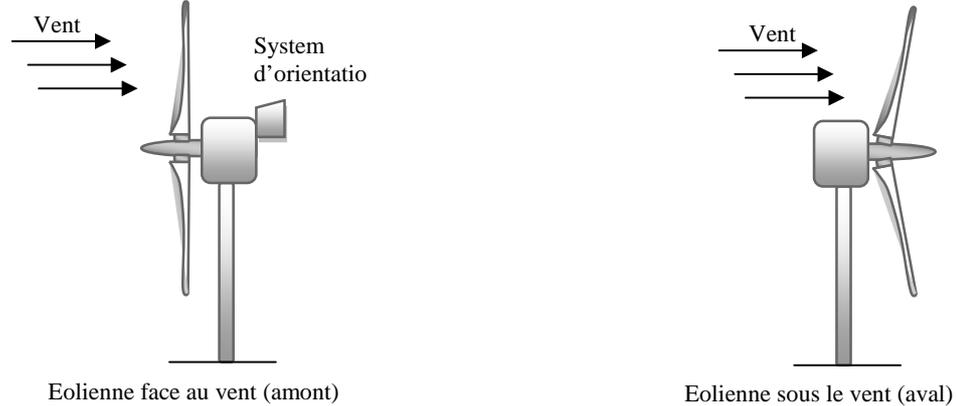


Figure II-9 : Aéro-générateur à axe horizontal [MOK 14].

II.1.2.2 Avantages et inconvénients d'un système éolien [ROU16] [KEN 12].

Le système éolien a beaucoup d'avantages :

- ☺ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable.
- ☺ L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.
- ☺ L'installation des turbines éoliennes est relativement simple par rapport à celle des centrales aux énergies traditionnelles.
- ☺ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes peuvent facilement être arrêtées.
- ☺ La durée de vie des éoliennes modernes peut aller jusqu'à 25 ans, ce qui est comparable aux autres centrales de production conventionnelles.
- ☺ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ☺ C'est une source d'énergie universelle puisqu'elle ne concerne pas seulement quelques pays comme dans le cas d'énergie pétrolière.
- ☺ C'est une énergie moins coûteuse par rapport aux autres énergies renouvelables.

☺ Cette énergie intéressante pour les pays en voie de développement puisqu'elle se développe et s'intègre facilement dans un système électrique existant.

Malgré cela, les sources éoliennes présentent aussi quelques inconvénients:

- ☺ Les éoliennes génèrent des bruits mécaniques (multiplicateurs) et aérodynamiques (vitesse de rotation du rotor) qui peuvent atteindre jusqu'à 55dB.
- ☺ La qualité d'énergie électrique produite n'est pas toujours bonne à cause de la vitesse du vent qui n'est pas toujours constante.
- ☺ Les éoliennes présentent des risques d'accidents lors des fortes vitesses du vent qui peuvent rompre les structures du système.
- ☺ Les parcs éoliens constituent un obstacle à la propagation et à la réception des ondes hertziennes.
- ☺ Les éoliennes créent des paysages indésirables.
- ☺ L'énergie éolienne reste liée à la météo et à l'environnement.
- ☺ Les éoliennes nuisent à la migration des oiseaux.

II.1.3 Pile à Combustible (PàC)

Une pile à combustible est un générateur électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, le gaz naturel, le monoxyde de carbone et le méthanol,...) en énergie électrique par une réaction chimique. Elle est composée des cellules unitaires. Chaque cellule est constituée de deux électrodes (anode et cathode) où se déroulent les réactions électrochimiques, séparées par un électrolyte qui assure le transfert des ions et bloque le passage des électrons [Sen13] [Ezi12].

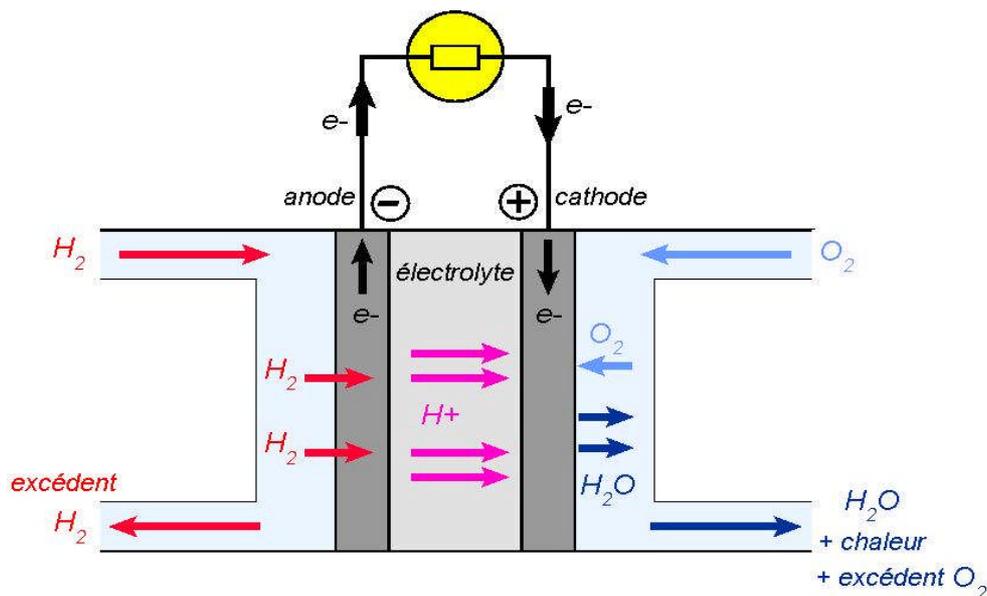
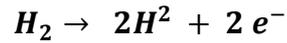


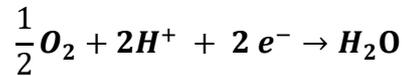
Figure II-10 : Schéma de principe d'une pile à combustible.

À l'anode, l'hydrogène est oxydé en protons selon la réaction

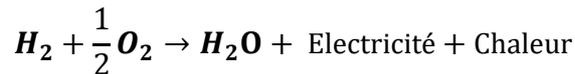


La molécule d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode.

À la cathode, les protons réagissent avec l'oxygène pour former de l'eau et absorber les électrons.



La réaction électrochimique globale d'une PàC est donnée par l'équation suivante :



Pratiquement, une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 V. Donc, il faut assembler les cellules en série pour constituer des stacks (modules), afin d'obtenir la tension et la puissance requises au consommateur.

La figure suivant montre la structure d'un module PEM

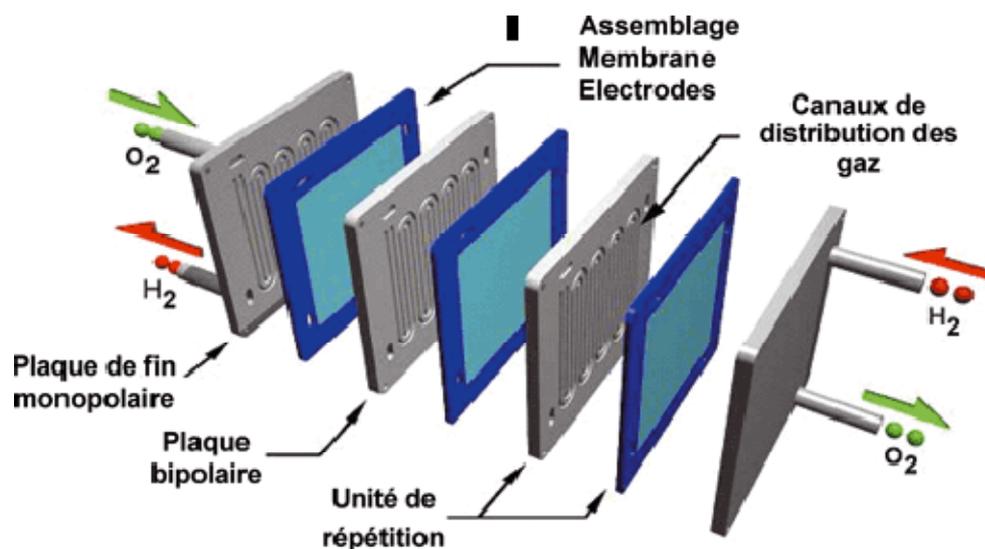


Figure II-11 : Structure d'un module PEM.

II.1.3.1 Différents types des PàC

Les piles à combustible sont arrangées selon la température de fonctionnement et le type d'électrolyte. Elles peuvent être classées en cinq familles. Le tableau 1.2 décrit les caractéristiques des différents types de PàC.

- PEMFC : Pile à membrane polymère échangeuse de protons ;
- SOFC : Pile à oxyde solide ;
- PAFC : Pile à acide phosphorique ;
- MCFC : Pile à carbonate de fondu ;
- AFC : Pile alcaline.

Pour notre cas, nous avons choisi une PàC du type PEM.

Type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Liquide Alcaline	Solide Membrane Polymère	Liquide immobilisé H ₃ PO ₄	Liquide immobilisé Carbonate fondu	Solide Céramiques à base d'oxydes	Solide Acide fort / membrane
Température de fonctionnement (°C)	60-80	60-100	180-220	600-700	650-1000	60-100
Rendement %	55-60	40-50	36-45	43-60	50-55	32-40

II.1.3.2 Avantages et inconvénients d'une PàC

La PàC a beaucoup d'avantages :

- ☺ Pendant le fonctionnement, la PàC ne produit que de l'eau et ne rejette aucun gaz polluant;
- ☺ Produit de l'énergie électrique sans bruit;
- ☺ Prend peu de place ;
- ☺ Demande peu d'entretien ;
- ☺ Rendement élevé.

Toutefois, leurs inconvénients sont :

- ☹ Coût de fabrication élevé ;
- ☹ Durée de vie faible.

II.1.4 Électrolyseur

L'électrolyse de l'eau est une méthode qui permet la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. La réaction électrochimique d'électrolyse de l'eau est donnée par l'équation suivante [Moh15] [Dar11].

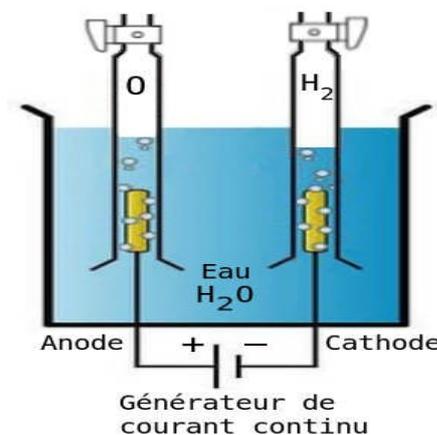


Figure II-12 : Structure d'un module PEM.

II.1.4.1 Type d'électrolyseurs

Principalement, Il existe trois types d'électrolyseurs, la technologie alcaline, la technologie à membrane et la technologie à vapeur d'eau à haute température [Dar11] [Tar12].

II.1.5 Système de stockage

L'utilisation de sources d'ER induit le concept de stockage d'électricité en raison du caractère intermittent de ces sources (comme l'énergie solaire et éolienne...). L'utilisation du moyen de stockage d'électricité est très variée; elle dépend de la nature des besoins et du type d'applications. En particulier, les SEH sont isolés du réseau, ces derniers intègrent au moins une source d'ER dotée d'un système de stockage. Deux types de stockage sont utilisés dans les SEH : le stockage à court terme et le stockage à long terme.

- La stratégie de stockage à court terme permet de filtrer les fluctuations des ER, cette stratégie réduit également le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels, donc la consommation du carburant.
- Le stockage à long terme est utilisé pour assurer une continuité d'approvisionnement de l'énergie pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours).

Le système de stockage peut être aussi utilisé avec les systèmes raccordés au réseau électrique, afin d'éliminer les fluctuations de puissance à court terme, de plus d'assurer la continuité du service en cas de défaillance du réseau [MAD18].

II.1.5.1 Les batteries :

Une batterie ou un accumulateur électrochimique est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique d'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie. En particulier les trois types des batteries : plomb-acide, nickel-cadmium et lithium-ion, en raison de leurs maturités et de leurs faibles coûts. Ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique, sans émission de polluants [Urb09] [ZAN10].

a) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide)

Elle présente plusieurs avantages, c'est la moins chère par rapport à d'autres technologies, elle est presque entièrement recyclable (plus de 90%) et leur autodécharge est faible. Cependant, ce genre de batteries est sensible aux décharges trop profondes conduisant à une diminution importante de leur durée de vie [Dil04].

b) Batterie au lithium-Ion (li-Ion)

Les performances de ce type sont bien meilleures que les autres. Leur autodécharge est très faible (1 % par mois), cela signifie que l'énergie massique stockée est relativement bien supérieure, caractérisée par une tension de fonctionnement élevée permettant la réduction du nombre d'éléments pour une tension donnée et leur durée de vie élevée; Mais le coût est beaucoup plus élevé à cause de leur fabrication qui nécessite un investissement bien supérieur que celui des batteries au Plomb. En plus, la batterie lithium contient un pourcentage élevé de métaux lourds et dangereux, en effet leur recyclage est compliqué et n'atteint pas la maturité [Bou09].

c) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Elle est robuste, mais souffre d'un coût élevé, d'une tension de cellule relativement faible, une autodécharge assez rapide (20% par mois). Telle la batterie lithium-Ion, leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant. À cause des limites des batteries au lithium-Ion et aux alcalines, nous préférons la batterie au plomb. Dans notre travail, nous proposons un système de contrôle de la charge et de la décharge de batteries, afin de prolonger la durée de vie et éviter la dégradation due aux décharges profondes ou des surcharges [Bou09].

II.1.5.2 Caractéristiques des batteries

Les paramètres techniques les plus représentatifs identifiés d'un accumulateur sont les suivants [Ait12]:

- **Capacité nominale:** c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah).
- **Tension d'utilisation :** C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **Durée de vie et cycle de vie:** les deux caractéristiques définissent la durabilité d'un système de stockage. La durée de vie est mesurée en années. D'autre part, la durée de vie du cycle est mesurée dans les cycles de charge-décharge.
- **Profondeur de décharge :** La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge.
- **Autodécharge:** définit l'énergie perdue par un système de stockage pendant le temps de non-utilisation. Ce paramètre est mesuré par la relation entre l'énergie perdue pendant une

certaine période de temps (heure, jour ou mois) et la capacité énergétique du dispositif de stockage.

- **Rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- **Etat de charge (SOC)** : c'est la quantité d'énergie disponible divisée par la capacité nominale de la batterie. Si $SOC = 1$, la batterie est chargée et quand : $SOC = 0$, la batterie est vide.

II.1.5.3 Dimensionnement du parc batteries

Pour réaliser le dimensionnement du parc batteries, on procède de la façon suivante:

Etape 1 : On calcule l'énergie consommée (E_c) par les différents récepteurs ;

Etape 2 : On détermine le nombre de jour d'autonomie nécessaire ;

Etape 3 : On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisée ;

Etape 4 : On calcule la capacité (C) de la batterie en appliquant la formule ci-dessous ;

$$C = \frac{E_c \cdot N}{D \cdot U}$$

C : Capacité de la batterie en ampère. heure (Ah)

E_c : Énergie consommée par jour (Wh/j)

N : Nombre de jour d'autonomie

D : Décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb)

U : Tension de la batterie (V)

II.1.6 Convertisseurs

Il existe différentes architectures des systèmes multi-sources comme on a vu précédemment. Cependant, l'objectif principal d'un tel système est de maximiser la production de puissance des sources. Pour cela, chacune est connectée à un convertisseur, qui permet de contrôler son point de fonctionnement et le relier au bus commun avec l'adaptation nécessaire. Différentes topologies de connexion des sources de production d'énergie, soit des sources d'ER ou des sources conventionnelles dans les SEH sont proposées dans la littérature. Cependant, le choix du convertisseur se fait selon :

- Configuration du bus dans le SEH où les sources sont connectées,
- Objectifs que l'on souhaite réaliser, par exemple : maximisation de la production de puissance des sources, adaptation de la tension....

Dans le cas d'un SEH autonome de structure à bus DC, un onduleur doit être utilisé pour alimenter une charge si elle est alternative.

II.1.6.1 Topologies de connexion du GPV au bus DC

Généralement, dans un SEH autonome de structure à bus DC, les GPV sont connectés à ce dernier à travers un hacheur pour optimiser leur fonctionnement. Comme la montre la figure suivante. Il existe trois configurations possibles afin de relier le GPV au bus DC. Le choix d’une topologie à utiliser dépendra de la tension du bus DC, qui doit être respectée. Elle est souvent imposée par le biais d’un hacheur [Cro13].

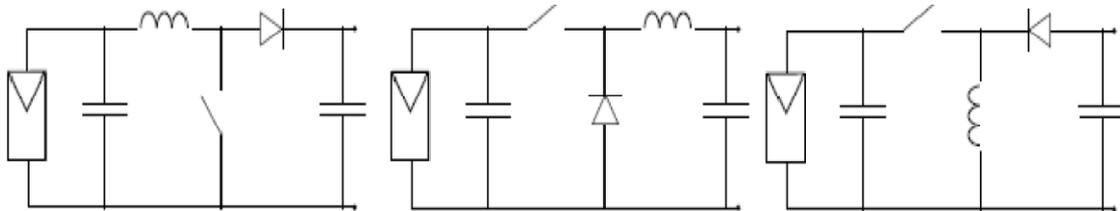


Figure II-13 : Convertisseurs utilisables dans les GPV : (a) Boost, (b) Buck, (c) Buck-Boost.

II.1.6.2 Topologies de connexion d’éolienne au bus DC

Dans les systèmes multi-sources isolés, la connexion du système éolien au bus DC, utilise deux configurations: l’association de l’éolien à un redresseur à diodes et un hacheur, comme le montre la figure suivant (a), permettant d’avoir une seule variable de commande à gérer et l’association de l’éolien à un redresseur MLI, comme expose la figure suivant(b), permettant d’utiliser un seul convertisseur [Dah15].

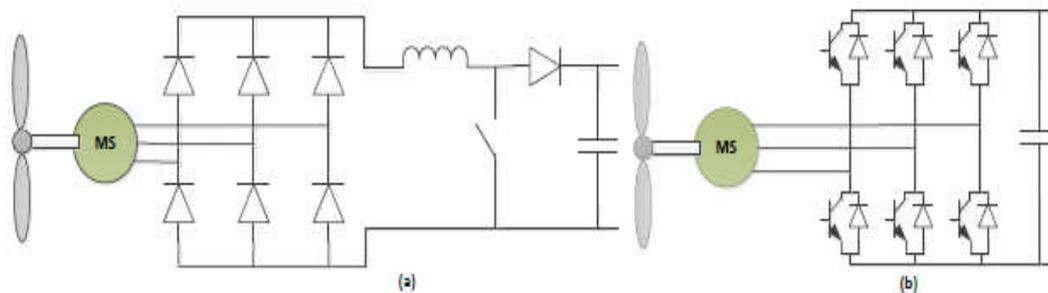


Figure II-14 : Convertisseurs utilisables dans le système éolien : (a) Redresseur à diodes avec un hacheur, (b) Redresseur MLI.

II.1.6.3 Topologies de connexion de la batterie au bus DC

La connexion entre la batterie et le bus DC est assurée via un hacheur réversible en courant pour effectuer le transfert d’énergie dans les deux sens afin d’assurer la charge/décharge des batteries. L’architecture de connexion de la batterie au bus DC est présentée dans la figure suivante [Vec05].

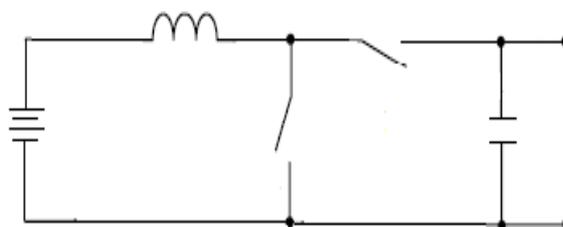


Figure II-15 : Convertisseur utilisable dans le système de stockage.