

**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

*Université de Relizane*

*Faculté des Sciences et Technologies*



**جامعة غليزان**  
RELIZANE UNIVERSITY

*Département : d'Electrotechnique et d'Automatique*

**POLYCOPIE de Cours**

## *Les Energies Renouvelables*

*Filière : Electrotechnique*

*Master 1 : Electrotechnique Industrielle*

**Réalisé par :**

**Dr. MOSTEFA Abdelkader    MCB    U. Relizane**

*Année Universitaire : 2021-2022*

## **Avant-propos**

Aujourd'hui, le monde fait face à une croissance très forte de la demande en énergie (une augmentation de 50 % de la demande énergétique mondiale est attendue d'ici 2030), à l'augmentation des prix de l'énergie (le prix du baril de pétrole oscille aux environs de 50-80 \$), à la diminution des ressources en énergie fossile (plus de 60 pays producteurs de pétrole ont déjà dépassé leurs pics de production). Par ailleurs, des régulations fortes sur les émissions de gaz à effet de serre sont peu à peu mises en place, obligeant les états à modifier sa politique énergétique et à se tourner vers des sources des énergies renouvelables. Le soleil, l'eau, le vent, les marées, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer l'énergie grâce aux technologies développées par les chercheurs. Tous ces éléments, alliés à des technologies de plus en plus performantes, représentent des sources naturelles d'énergie propre, soutenable, inépuisable et favorable à l'environnement. Les énergies renouvelables, lentement, trouvent des applications adaptées et économiquement viables dans de multiples domaines.

Dans ce support de cours concernant les énergies renouvelables nous allons exposer des généralités sur les différents types des énergies renouvelables avec leurs principes de fonctionnement et les différentes techniques utilisées. Ce travail a été effectué à base de la collecte de données précises et ciblés afin de faciliter la compréhension aux étudiants.

Ce travail s'adresse essentiellement aux étudiants du deuxième cycle (première année master en : filière Electrotechnique, spécialité Electrotechnique Industrielle). En effet, l'objectif est de mettre à la disposition des étudiants un document de références qui peut leurs apporter un appui non négligeable et leurs permettre une illustration de toutes les parties enseignées en matière.

### **Objectifs de l'enseignement :**

Doter les étudiants des bases scientifiques leur permettant d'intégrer la communauté de la recherche scientifique dans le domaine des énergies renouvelables, des batteries et des capteurs associés à des applications d'ingénierie.

### **Connaissances préalables recommandées :**

Dispositifs et technologies de conversion de l'énergie.

### **Contenu de la matière :**

**Chapitre 1 :** Introduction aux énergies renouvelables.

**Chapitre 2 :** Energie solaire (photovoltaïque et thermique).

**Chapitre 3 :** Energie éolienne.

**Chapitre 4 :** Autres sources renouvelables : hydraulique, géothermique, biomasse.

**Chapitre 5 :** Stockage, pile à combustibles et hydrogène.

**Mode d'évaluation :** Examen : 100%.

<b>Avant-propos</b>	01
<b>Chapitre 1 : Introduction aux énergies renouvelables</b>	
1.1 Introduction	02
1.2 Les types d'énergie renouvelable	02
1.2.1 Énergie éolienne	03
1.2.2 L'énergie solaire	05
1.2.3 Énergie hydroélectrique	07
1.2.4 La Biomasse	07
1.2.5 La géothermie	08
1.3 Le programme national des énergies renouvelables	08
1.3.1 Programme de développement des énergies renouvelables	10
1.4 Micro-réseaux : la base des réseaux intelligents	13
1.4.1 Définitions des micro-réseaux	13
1.4.2 Architecture d'un micro-réseau	13
1.5 Rendre les réseaux électriques intelligents	17
1.5.1 L'architecture du système électrique intelligent	17
1.6 Conclusion	18
<b>Chapitre 2: Energie solaire (photovoltaïque et thermique)</b>	
2.1 Introduction	19
2.2 Déclinaison du soleil	19
2.3 Rayonnement solaire	20
2.3.1 Modèle simple de l'éclairement	20
2.4 L'Energie solaire photovoltaïque	21
2.4.1 Principe de fonctionnement	21
2.4.2 L'effet photovoltaïque	22
2.4.3 Les différents types d'installations solaires photovoltaïques	23
2.4.4 Influence de l'éclairement	24
2.4.5 Le panneau solaire	25
2.4.6 Protection des systèmes photovoltaïque	30
2.4.7 Les caractéristiques courant-tension	31
2.4.8 Les technologies	32
2.4.9 Les paramètres des panneaux solaires	33
2.5 La batterie	34
2.6 Le régulateur	35
2.7 L'onduleur	35
2.8 Une application d'installation autonome	36
2.9 Energie solaire thermique	41
2.10 Conclusion	44

**Chapitre 3 : Energie éolienne**

3.1 Introduction	45
3.2 Définition des systèmes éoliens	45
3.3 Classification des types d'éoliennes	45
3.4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	52
3.4.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"	53
3.4.2 Système à pas variable "Pitch"	55
3.5 Choix d'aérogénérateurs et leurs raccordements avec le réseau	56
3.6 Conclusion	61

**Chapitre 4 : Energie de la biomasse**

4.1 Introduction	62
4.2 Les biomasses comme source de chaleur	62
4.3 Un combustible renouvelable	64
4.4 La chaîne d'approvisionnement	67
4.5 La valorisation énergétique	69
4.6 Les biomasses sucrées, amylacées ou oléagineuses	75
4.7 Conclusion	76

**Chapitre 5 : Stockage, pile à combustibles et hydrogène**

5.1 Introduction	77
5.2 Stockage de type mécanique	78
5.2.1 Historique de développement du stockage d'énergie par pompage	78
5.2.2 Stockage hydropneumatique	82
5.2.3 Stockage par air comprimé CAES	83
5.2.4 Le stockage inertiel	84
5.3 Le stockage thermique	86
5.3.1 Les différents types de stockage thermique	86
5.4 Les systèmes de stockage électrochimique	87
5.4.1 Accumulateurs électrochimiques	88
5.4.2 Principe de fonctionnement	88
5.4.3 Technologies	89
5.5 L'hydrogène comme vecteur d'énergie	93
5.5.1 Stockage d'hydrogène	93
5.5.2 Accumulateur à combustible	96
5.6 Condensateurs	96
5.7 Supercondensateurs	97
5.8 Stockage à inductance supraconductrice SMES	99
5.7 Conclusion	100

**C  
H  
A  
P  
I  
T  
R  
E  
  
1**

**Introduction aux énergies  
renouvelables**

## 1.1 Introduction

La demande d'énergie électrique augmente rapidement. On estime que la demande d'électricité doublera entre 2000 et 2030, avec un taux de croissance annuel de 2,4%, plus rapide que l'augmentation de toute source d'énergie non renouvelable. Les sources d'énergies renouvelables seront nécessaires dans les futurs systèmes énergétiques. Aux États-Unis, la production des énergies renouvelables est fixée comme objectif d'augmenter le pourcentage à 33 % d'ici 2020. En Europe, l'objectif est d'augmenter le pourcentage des énergies renouvelables de 20% actuellement à 50% d'ici 2050. Les sources des énergies renouvelables sont généralement localisées de manière décentralisée, donc un système énergétique plus vaste et plus complexe.

Récemment, l'intégration des ressources des énergies renouvelables décentralisées évolue comme un scénario énergétique émergent et prometteur pour le système énergétique. Le réseau intelligent, en tant que réseau électrique modernisé, utilise les technologies de l'information et des communications pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la rentabilité de la production et de la distribution de l'électricité. En tant qu'élément principal du réseau intelligent, le micro-réseau (MG : Micro Grid) intègre un certain nombre d'unités locales de production décentralisée, de système de stockage d'énergie et des charges locales pour former un réseau électrique à petite échelle.

Le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais des données économiques et des politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables. On peut dire aussi que l'énergie photovoltaïque est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

## 1.2 Les types d'énergie renouvelable

Dans le monde, il existe différents types des sources d'énergie renouvelable (SER) à partir desquels nous pouvons utiliser de l'énergie renouvelable ou verte. Cependant, nous connaissons six types des sources d'énergie renouvelable, comme indiqué sur la (figure 1.1).

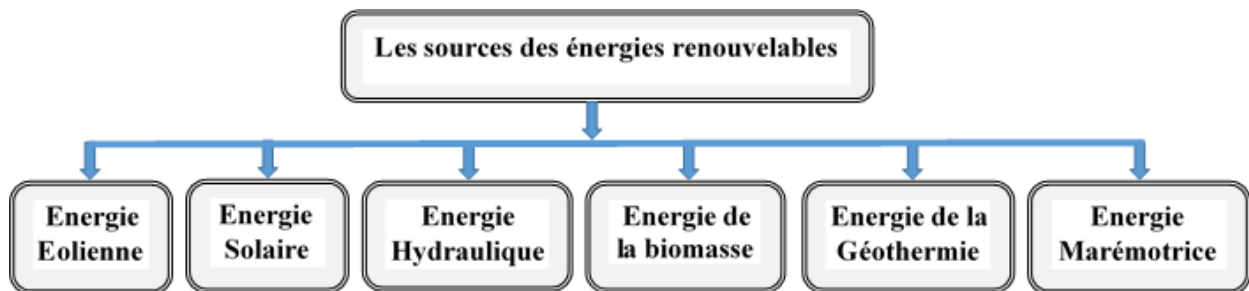


Figure 1.1 : Classification d'énergie renouvelable

Ces sources d'énergie renouvelable nous donnent les moyens de générer de l'énergie non seulement de manière alternative, mais aussi de manière traditionnelle. En utilisant ces sources

correctement, nous pouvons évoluer vers un environnement sain et sécurisé. Cela nous aide à minimiser les émissions de carbone dans l'environnement.

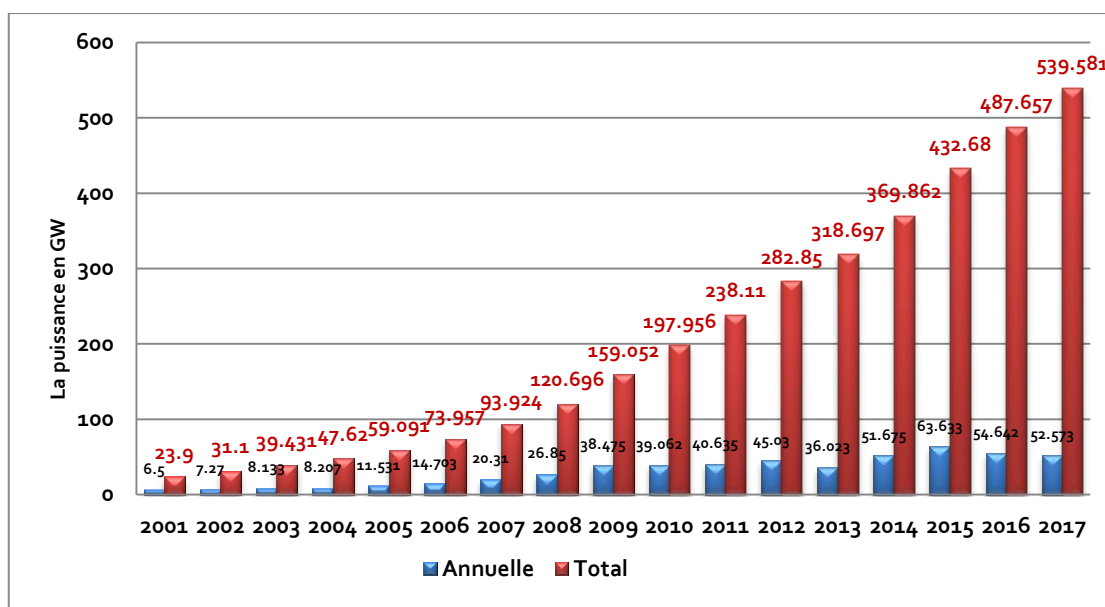
La plupart des énergies renouvelables dépendent directement ou indirectement des rayonnements du soleil. L'hydro cycle est le résultat de l'énergie solaire. L'hydro cycle et l'écoulement gravitaire de l'eau sont les aspects fondamentaux qui établissent le système pour gagner de l'énergie hydroélectrique. L'énergie solaire est directement convertie depuis la lumière du soleil. Des capteurs ou des cellules photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité. Encore une fois, les plantes collectent l'énergie solaire et ces plantes sont converties en "Biomasse".

Certaines sources des énergies renouvelables ne dépendent pas de l'énergie solaire, comme l'énergie géothermique et l'énergie marine. Dans le cas de l'énergie marine, la conversion des vagues, l'énergie gravitationnelle et potentielle de la masse d'eau, la salinité différentielle sont les concepts fondamentaux pour produire de l'électricité à partir de cette ressource. Les sources d'énergie renouvelable se reconstituent rapidement et de manière efficace et peuvent être réutilisées toujours. C'est pourquoi les énergies renouvelables sont parfois qualifiées de "ressources énergétiques inépuisables".

### **1.2.1 Énergie éolienne**

Depuis 1990, l'énergie éolienne est l'un des secteurs qui connaît une croissance rapide dans le monde. L'énergie éolienne est générée par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et ensuite l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique. Quand l'air circule, il fait tourner les pales qui font tourner un arbre et le générateur qui le relie produit de l'électricité. Cependant, la tâche la plus difficile dans cette conversion est de concevoir des turbines rentables avec des pales aéronautiques. Les turbines disponibles actuellement ne peuvent capter que 40 à 50% de l'énergie totale disponible. Ces éoliennes peuvent généralement produire de 5 à 300 MW, bien que l'on trouve aussi des éoliennes de plus ou moins de moindres capacités.

Au total, 52,5 GW d'énergie éolienne ont été installées dans le monde en 2017, soit une légère baisse par rapport aux 54,6 GW en 2016. Selon le GWS (Global Wind Statistics 2017), la capacité totale mondiale d'énergie éolienne était plus de 539581 MW (figure 1.2).



**Figure 1.2:** la capacité mondiale installée en énergie éolienne (2001-2017)

En comparaison avec d'autres pays du monde, En 2017, la Chine a encore une fois dominé les marchés mondiaux en ajoutant 19500 MW de nouvelles capacités au réseau électrique du pays. Bien qu'il s'agisse d'une baisse de 15,9% sur le marché de 2016, il représente encore 37% des installations mondiales. Cela porte le total cumulé des installations de la Chine à 188232 MW, soit une augmentation de 11,7 % par rapport à l'année précédente. A partir du tableau.1.1, nous pouvons estimer la production mondiale actuelle d'électricité à partir de l'énergie éolienne.

**Tableau. 1.1 :** Capacités éoliennes des principaux pays du monde (en MW).

Pays	Augmentation de la capacité en 2017	Capacité totale
	(MW)	(MW)
Chine	19500	188232
Etats-Unis	7017	89077
Allemagne	6581	56132
Royaume-Uni	4270	18872
Inde	4148	32848
Brésil	2022	12763
France	1694	13759
Turquie	766	6857
Mexique	478	4005
Belgique	467	2843
Globale	52573	539581

En 1991, le premier parc éolien off-shore a été construit au Danemark. A partir d'un parc éolien terrestre, le Royaume-Uni a produit 7 TWh d'électricité en 2010. Selon les estimations, cela permet d'économiser l'émission de 6 millions de tonnes de gaz CO<sub>2</sub>.



### 1.2.2 L'énergie solaire

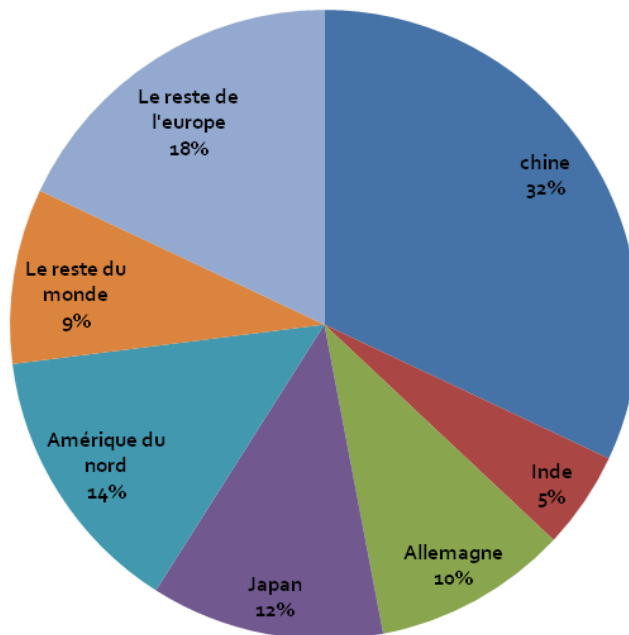
L'énergie solaire est produite à partir de l'énergie du soleil. Il existe deux types possibles :

- ✓ Utilisation d'une cellule photovoltaïque (PV)
- ✓ Génération d'énergie électrique par la méthode de concentration de l'énergie solaire (CSP: Concentrated solar power).

Ces techniques sont bien connues dans le monde entier et ont été installées dans de nombreuses régions du monde pour produire de l'électricité au cours de la dernière décennie. L'emplacement est le facteur principal pour la production d'énergie solaire. Direct et diffus sont les deux composantes du rayonnement solaire. Lorsque le rayonnement solaire arrive sur la terre, deux choses se produisent : l'absorption et la diffusion. Dans le cas d'un rayonnement direct, le rayon du soleil vient directement en ligne alors que dans le cas d'un rayonnement diffus, il est dispersé par différents phénomènes comme les nuages. L'irradiation globale du soleil est la somme des faisceaux directs, diffus et réfléchis.

La concurrence mondiale s'intensifie sur le marché du solaire photovoltaïque. Plus d'un millier de fournisseurs et d'organisations travaillent dans le monde entier pour fournir des cellules photovoltaïques et leurs modules.

Les grands segments des fournisseurs proviennent des États-Unis, du Japon, d'Europe et de Chine. Des nombreux pays investissent d'énormes sommes d'argent pour augmenter leur capacité photovoltaïque. Parmi eux, la Chine est le premier pays du marché avec une capacité de production de 43050 MW en 2015. La (figure 1.3) montre le scénario du pourcentage mondial de la capacité photovoltaïque. Le total cumulé des installations s'élevait à 415 GWc à la fin de l'année 2017.

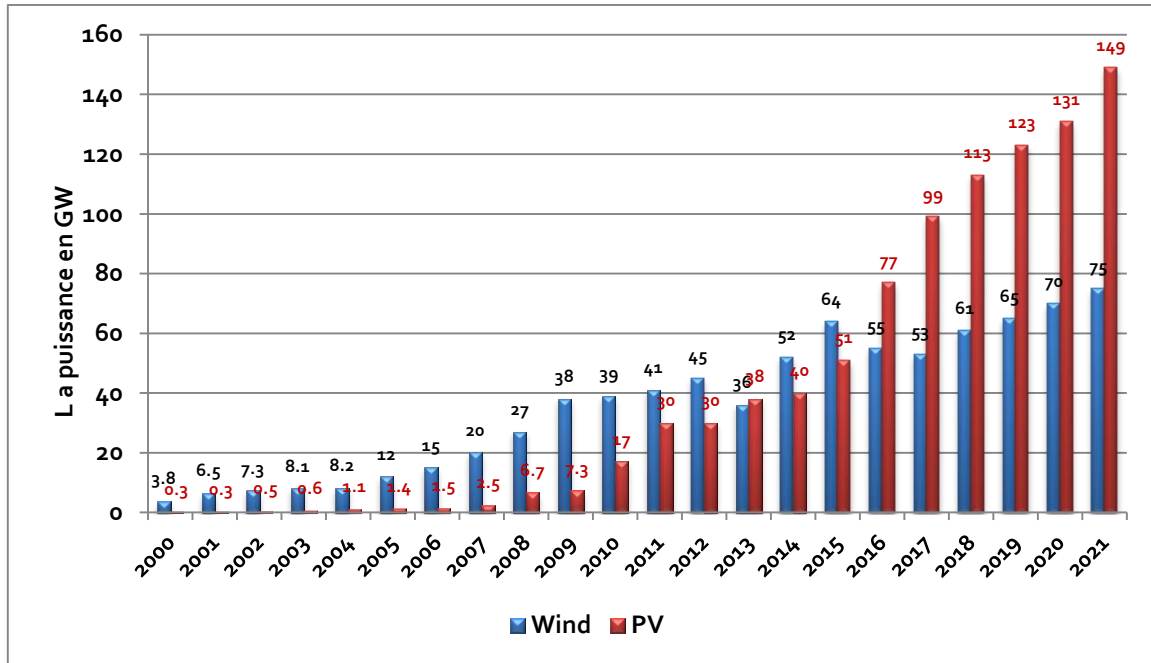


**Figure 1.3 :** Installation photovoltaïque globale par région.

En raison de la diminution considérable des prix au cours des dernières années, l'énergie solaire est maintenant largement reconnue comme une source d'énergie fiable et à prix

concurrentiel. La révolution solaire a véritablement commencé en 2008 lorsque les nouvelles installations sont passées de 2,5 GW l'année 2007 à 6,7 GW. En 2011, les nouvelles installations ont de nouveau explosé et ont terminé l'année à 30,1 GW (70,5 GW au total).

En 2013, l'installation des éoliennes ayant connu une forte diminution, le solaire a pour la première fois dépassé l'éolien dans les installations annuelles (figure 1.4). En 2016, l'énergie solaire a créé un écart important avec 77 GW dans les nouvelles installations ou 22 GW devant l'éolien. En 2017, les nouvelles installations photovoltaïques étaient presque deux fois plus élevées que les installations éoliennes (99 GW contre 53 GW).



**Figure 1.4 :** Les nouvelles installations annuelles actuelles et prévues dans le monde (2000-2021).

Le système photovoltaïque présente deux avantages majeurs :

- ✓ Les modules photovoltaïques peuvent être utilisés pour produire une quantité massive d'énergie, ce qui permet de réaliser des économies à grande échelle (les économies d'échelle signifient que si la production est à grande échelle, son coût peut être minimisé).
- ✓ Un système PV est un système très modulaire qui utilise la lumière solaire directe ainsi que la composante diffuse de la lumière solaire. Il peut fonctionner même sous un ciel peu clair.

#### a) *Installations CSP*

Au début, les centrales commerciales de CSP produisaient 354 MW en Californie et ont continué à fonctionner commercialement jusqu'à présent. En 2009, des centrales CSP de 700 MW ont été installées et des centrales CSP de 1500 MW étaient en construction dans le monde.

Le CSP est un type de technologie solaire thermique. Il se compose de deux parties : un collecteur et un convertisseur. Ce type d'installation nécessite une grande surface pour capter le rayonnement solaire. Les systèmes de tours électriques, les systèmes d'auge et les systèmes de paraboles/moteurs sont utilisés dans les centrales CSP.

### 1.2.3 Énergie hydroélectrique

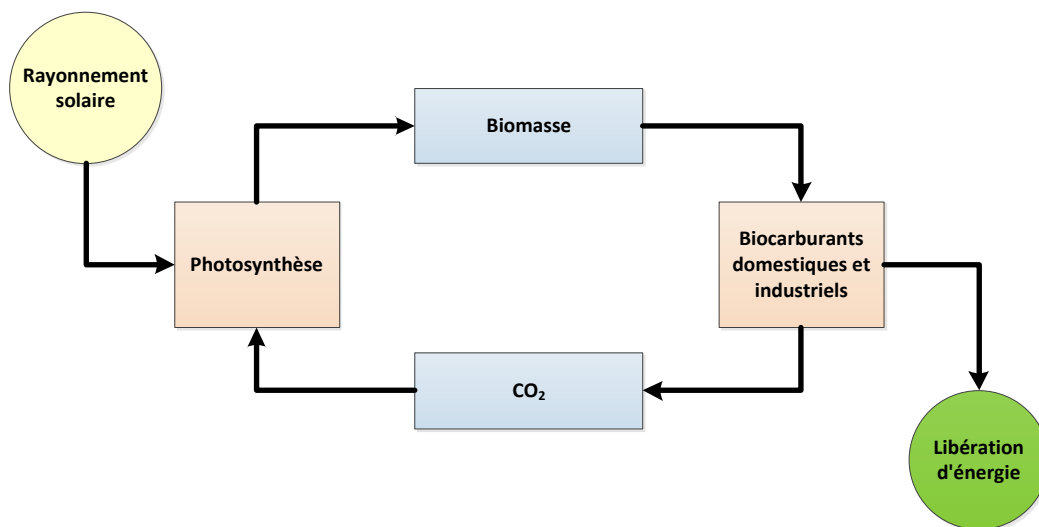
L'énergie hydraulique est l'une des énergies renouvelables les plus couramment utilisées, qui génère environ 16% de l'électricité mondiale en 2008. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), en 2008, la production mondiale d'hydroélectricité était de 3288 TWh. En 2015, dans le monde entier, 33,7 GW d'énergie hydraulique ont été récemment installés. Par conséquent, l'énergie hydraulique est sûrement devenue plus amicale pour les pays et pour les autorités. C'est pourquoi, 16,4 % de l'énergie mondiale et 71 % de l'énergie produite à partir des énergies renouvelables proviennent de l'hydroélectricité. Dans ce secteur, les principaux dominateurs du marché sont présentés dans le tableau (1.2).

**Tableau 1.2 :** Position mondiale et capacité installée des 3 premiers pays en hydroélectricité.

Position	Pays	Capacité globale installée (Part du marché mondial) (%)
1	Chine	26
2	États-Unis	8.4
3	Brésil	7.6

### 1.2.4 La Biomasse

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. Les dernières données montrent que la "bioénergie" fournit 10% de l'énergie mondiale. La biomasse ligneuse et les déchets des forêts fournissent 56 EJ (1 EJ = Exajoule =  $10^{18}$  J). Les zones d'Amérique latine et des Caraïbes utilisent beaucoup de biomasse. La biomasse et les biocarburants sont la collecte de l'énergie solaire par photosynthèse, comme le montre la (figure 1.5).



**Figure 1.5:** Formation de biomasse et de carburant.

La capacité mondiale de production de biomasse est portée de 66 à 72 GW en 2012. Le taux de croissance moyen en 2012 était de 5%. A long terme, la production de biomasse ainsi que la production d'électricité à partir des déchets pourraient atteindre 270 GW d'ici la fin de 2030.

### 1.2.5 La géothermie

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur d'une part, et d'utiliser l'énergie géothermique pour chauffer ou rafraîchir des maisons d'autre part. Elle produit de l'électricité sans faire du mal à l'environnement. En 2017, la capacité mondiale installée à partir de la géothermie a représenté 12.913 GW (figure 1.6)).

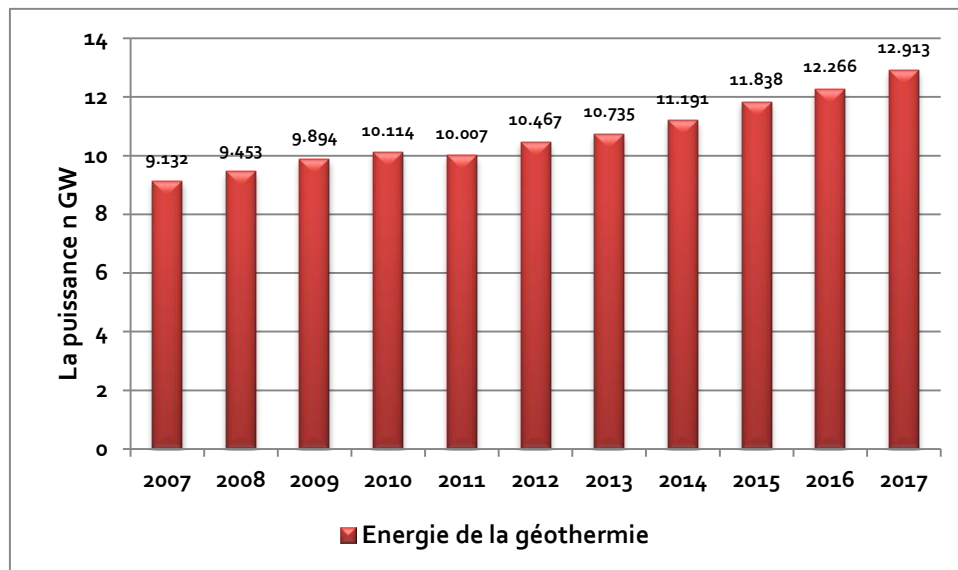


Figure 1.6 : la capacité mondiale installée en énergie de la géothermie.

### 1.3 Le programme national des énergies renouvelables

Le programme national de développement des énergies renouvelables dans sa version actualisée par les services du ministère de l'énergie vient d'être adopté par le gouvernement. En effet, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation des projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles, durant laquelle des éléments pertinents concernant les évolutions technologiques des filières considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme.

Parmi ces éléments nouveaux, il convient de citer :

- ✓ Une meilleure connaissance du potentiel national en énergie renouvelable, notamment pour le solaire et l'éolien, suite aux études engagées ;
- ✓ Les coûts encore élevés de la filière CSP (solaire thermique) induisant une croissance très lente du développement de ce marché à travers le monde ;

- ✓ Le parachèvement d'une réglementation nationale cohérente et attractive en direction des investisseurs.

La révision de ce programme porte ainsi, sur le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle, sur l'introduction des filières de la biomasse (valorisation des déchets), de la cogénération et de la géothermie, et également sur le report, à 2021, du développement du solaire thermique (CSP). La consistance du programme en énergies renouvelables à réaliser pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030 est de 22000 MW, dont plus de 4500 MW seront réalisés d'ici 2020.

Conformément à la réglementation en vigueur, la réalisation du programme est ouverte aux investisseurs du secteur public et privé nationaux et étrangers. Les retombées de ce programme seront très significatives en termes de création d'emplois, d'industrialisation, de développement technologique et d'acquisition de savoir-faire, contribuant ainsi à la croissance et à la modernisation économique du pays ainsi qu'à la préservation de l'environnement.

Aussi et afin d'encourager et soutenir les industriels dans la réalisation de ce programme, il est prévu, entre autres, la réduction des droits de douane et de la TVA à l'importation pour les composants, matières premières et produits semi-finis utilisés dans la fabrication des équipements en Algérie, dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Les projets des énergies renouvelables de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

**Première phase 2015 - 2020** : Cette phase a été programmée (verra) pour la réalisation d'une puissance de 4000 MW, entre photovoltaïque et éolien avec une soixantaine de centrales, ainsi que 500 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

**Deuxième phase 2021 - 2030** : Le développement de l'interconnexion électrique entre le nord et le sud (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Béchar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de recherche ainsi que l'acquisition de l'expérience nécessaire, qui permettra, à terme, d'employer le génie local algérien, pour toutes les phases de développement de ces domaines. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs dizaines de milliers d'emplois directs et indirects. La production d'électricité est estimée atteindre 170 TWh en 2030. L'intégration du renouvelable dans le mix énergétique constitue un enjeu majeur en vue de préserver les ressources fossiles, de diversifier les filières de production de l'électricité et de contribuer au développement durable. Toutes ces considérations justifient, dès aujourd'hui, la forte intégration des énergies renouvelables dans la stratégie d'offre énergétique à long terme, tout en accordant un rôle important à l'efficacité énergétique. Associée au développement des énergies renouvelables, l'efficacité énergétique permet une réduction des investissements nécessaires à la satisfaction des besoins énergétiques, à travers une bonne maîtrise de la consommation et du rythme de croissance de la demande.

### 1.3.1 Programme de développement des énergies renouvelables

Ce programme porte sur le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle. L'introduction du solaire thermique (CSP) ainsi que les filières de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie interviendra graduellement.

Les capacités et types d'énergies renouvelables seront installés selon les spécificités de chaque région :

- ✓ Région du Sahara, pour l'hybridation des centrales diesel existantes et l'alimentation des sites éparses compte tenu de l'important potentiel solaire et éolien existant au niveau de cette région ;
- ✓ Région des Hauts Plateaux, pour son potentiel d'ensoleillement et d'exposition au vent, avec la disponibilité de terrains.
- ✓ Région du littoral selon la disponibilité des assiettes de terrain avec l'exploitation de tous les espaces où des potentiels renouvelables existent.

Par ailleurs, les besoins complémentaires pour d'autres domaines d'application font partie, également, de la capacité totale du photovoltaïque prévue dans le programme, tels que le résidentiel, l'agriculture, le pompage, les ressources en eau, l'industrie, l'éclairage public et les services.

Le tableau (1.3) donne les capacités cumulées du programme des énergies renouvelables, par type et phase, sur la période 2015 - 2030:

**Tableau 1.3** : les capacités cumulées du programme national des énergies renouvelables.

	<b>1<sup>ère</sup> phase 2015 -2020</b>	<b>2<sup>ème</sup> phase 2021- 2030</b>	<b>TOTAL (MW)</b>
<b>Photovoltaïque</b>	3 000	10 575	13 575
<b>Eolien</b>	1 010	4 000	5 010
<b>CSP</b>	-	2 000	2 000
<b>Cogénération</b>	150	250	400
<b>Biomasse</b>	360	640	1 000
<b>Géothermie</b>	05	10	15
<b>TOTAL</b>	4 525	17 475	22000

Pour l'exportation de l'électricité verte, vers l'Europe, l'Algérie se prépare à entreprendre des partenariats dès que les conditions seront réunies, et ceci à travers la réalisation de capacités additionnelles.

#### a) Développement des capacités industrielles

Pour accompagner et réussir le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, l'Algérie envisage de renforcer le tissu industriel pour être à l'avant-garde des mutations positives, aussi bien sur les plans industriel et technique que sur les plans de l'ingénierie et de la recherche. L'Algérie est également déterminée à investir dans tous les segments créateurs de valeurs et à les développer localement.

**b) Solaire photovoltaïque**

Pour le photovoltaïque, l'objectif est la réalisation d'unités industrielles ; notamment la construction d'usines de fabrication de modules photovoltaïques pour répondre à la réalisation d'un programme de l'ordre de 13500 MW à l'horizon 2030. Des actions de renforcement de l'activité d'engineering et d'appui au développement de l'industrie photovoltaïque à travers la constitution d'un partenariat qui regroupera les différents acteurs avec le concours des centres de recherche. Sur la période 2015-2020, l'objectif a été d'accroître le taux d'intégration des capacités algériennes, notamment grâce à la construction, en partenariat, d'usines de fabrication de modules photovoltaïques. Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et autres équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque.

L'Algérie devrait disposer, également, sur la même période, des capacités de conception, de procurement et de réalisation par le biais d'entreprises algériennes. Il est, également, prévu la réalisation, d'un centre d'homologation des équipements, notamment ceux destinés aux installations des énergies renouvelables et les électroménagers. Cette période serait marquée par le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements nécessaires à la réalisation de ce programme. Elle devrait, également, être marquée par la maîtrise totale des activités d'engineering, de procurement et de construction des centrales et des unités de dessalement des eaux saumâtres. Si les conditions sont réunies, il est prévu au courant de cette même période d'exporter non seulement l'électricité produite à partir des énergies renouvelables mais aussi le savoir-faire et les équipements entrant dans la production d'électricité à partir de ces énergies.

**c) Solaire thermique « CSP »**

Sur la période 2015–2020, il a été prévu la poursuite des études pour la fabrication locale des équipements de la filière solaire thermique. Sur la période 2021-2030, il est prévu de promouvoir le partenariat pour la mise en œuvre de projets majeurs qui seront menés en parallèle avec des actions de renforcement des capacités d'engineering , de conception, de procurement et de réalisation pour la fabrication d'équipements intervenant dans une centrale CSP par des moyens propres.

**d) Eolien**

Il est prévu de poursuivre les efforts pour la mise en place, en partenariat, d'une industrie éolienne. Il est prévu aussi la conception, le procurement et la réalisation d'éoliennes par des moyens propres ainsi que la maîtrise des activités d'engineering, de procurement et de construction de fermes éoliennes.

**e) Recherche et développement**

L'Algérie favorise la recherche pour faire du programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique un véritable catalyseur du développement d'une industrie nationale qui valorisera les différentes potentialités algériennes (humaines, matérielles, scientifiques...etc).

Le rôle de la recherche est d'autant plus crucial qu'elle constitue un élément primordial dans l'acquisition des technologies, le développement des savoirs et l'amélioration des performances énergétiques. Pour l'Algérie, accélérer l'acquisition et le recours aux technologies est essentiel notamment en matière de photovoltaïque, solaire thermique, l'éclairage, l'isolation thermique et la climatisation.

L'Algérie encourage également la coopération avec les centres de recherche en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Les universités, les centres de recherche, les entreprises et les différents acteurs de ce programme collaborent pour sa mise en œuvre et interviennent au cours des différentes étapes de la chaîne d'innovation. Ils valorisent ainsi davantage les atouts dont dispose le pays.

En effet, le développement à grande échelle des énergies renouvelables et la prise en charge de la problématique de l'efficacité énergétique exigent un encadrement de qualité en ressources humaines, à la hauteur des objectifs et des ambitions du programme EnR et de l'efficacité énergétique. Outre les centres de recherche affiliés aux entreprises comme le CREDEG (le Centre de Recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz), filiale du Groupe Sonelgaz, le secteur de l'énergie compte une agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) et une société filiale de Sonelgaz spécialisée dans la réalisation des projets des énergies renouvelables (SKTM : Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida). Ces organismes coopèrent avec des centres de recherche rattachés au ministère de la recherche scientifique, parmi lesquels figurent le CDER (Centre de Recherche dans le domaine des Energies Renouvelables) et le CRTSE (Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique).

La réflexion est basée sur des axes de recherche qui permettent d'étudier les comportements des équipements dans l'environnement où ils sont installés, d'améliorer leurs performances et de faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique dont les réseaux devront être gérés de manière plus réactive, grâce aux technologies de Smart Grids (réseaux intelligents). Ces technologies regroupent de nombreux outils et systèmes pour leur gestion. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication interviendront également afin d'optimiser les flux d'énergie et mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables. La coopération scientifique étant considérée comme une part essentielle pour le développement de toutes les activités de recherche dans les domaines des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, l'Algérie encouragera les échanges entre les entreprises et les différents centres de recherche. Dans ce cadre, il convient de souligner que le programme de l'efficacité énergétique prévoit le financement des projets pilotes, issus des travaux de recherche scientifique, concourant à une meilleure maîtrise de l'énergie. Ce financement est prévu comme un soutien aux chercheurs afin de stimuler leurs efforts de création scientifique.



## 1.4 Micro-réseaux : la base des réseaux intelligents

Il a été noté récemment que les systèmes d'électricité dans le monde ont commencé à "décentraliser, décarboniser et démocratiser", dans de nombreux cas du bas vers le haut. Le réseau d'aujourd'hui n'est pas une entité statique, cependant ; nous parcourons un arc historique qui a commencé avec la source d'énergie à petite échelle (reconnue comme les micro-réseaux à courant continu originaux) dont Thomas Edison a été le pionnier à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, qui a subi une consolidation et une centralisation sous l'effet d'une demande croissante, et c'est maintenant le début d'un retour à la décentralisation. Entre les années 1920 et les années 1970, la fiabilité accrue offerte par le raccordement de plusieurs groupes électrogènes à diverses charges, la diminution des coûts de construction par kilowatt (kW) et la capacité de puiser de l'électricité dans de grandes ressources de production éloignées comme l'hydroélectricité ont favorisé le développement du réseau que nous voyons aujourd'hui.

### 1.4.1 Définitions des micro-réseaux

Un certain nombre de définitions de micro-réseaux et de systèmes de classification fonctionnelle peuvent être trouvés dans la littérature. Une définition largement citée, élaborée pour les États-Unis. DOE (Department Of Energy), un groupe ad-hoc d'experts en recherche et déploiement, se lit comme suit :

Un micro-réseau est un groupe de charges et de sources d'énergie interconnectées dont les limites électriques sont clairement définies et qui agit comme une seule entité contrôlable par rapport au réseau. Un micro-réseau peut se connecter et se déconnecter au réseau pour lui permettre de fonctionner à la fois en mode connecté au réseau ou en mode isolé".

Cette description comprend trois exigences :

- ✓ qu'il est possible d'identifier la partie du système de distribution comprenant un micro-réseau distinct du reste du système ;
- ✓ que les ressources connectées à un micro-réseau sont contrôlées de concert plutôt qu'à distance ;
- ✓ et que le micro-réseau peut fonctionner indépendamment du fait qu'il soit connecté ou non au réseau plus vaste.

La définition ne dit rien sur la taille des ressources énergétiques ni sur les types de technologies qui peuvent ou devraient être utilisées.

### 1.4.2 Architecture d'un micro-réseau

L'architecture de base d'un système de micro-réseau est présentée dans la (figure 1.7), qui montre qu'un système de micro-réseau se compose généralement de quatre parties :

- le système de distribution
- les sources DG
- le stockage d'énergie,
- les modules de contrôle et de communication.

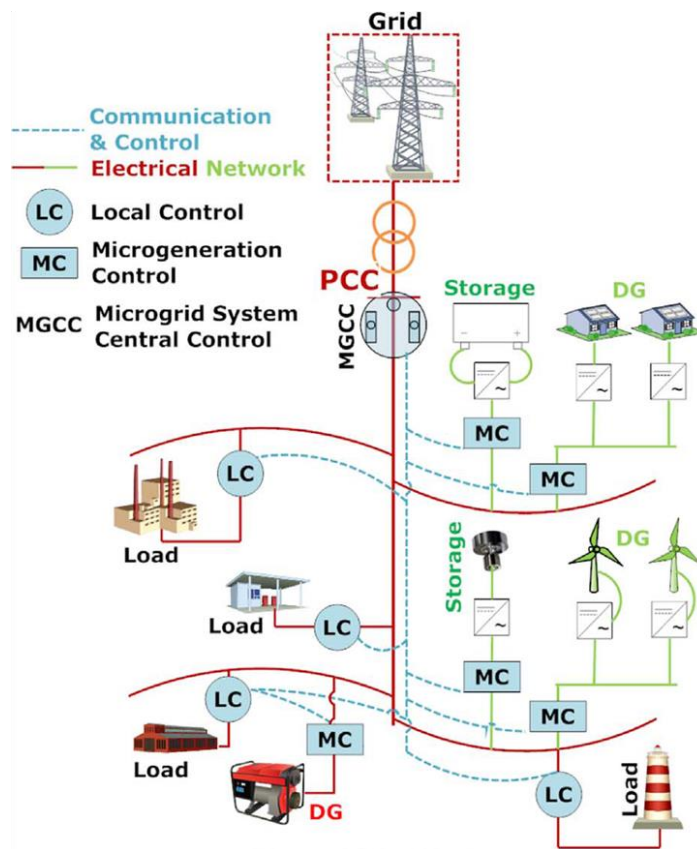


Figure 1.7 : Architecture d'un micro-réseau.

#### 1.4.2.1 Les ressources de production décentralisées (DG)

Les technologies de production décentralisée (production décentralisée) applicables au micro-réseau peuvent comprendre : système d'énergie éolienne, système solaire photovoltaïque (PV), système hydroélectrique, énergie géothermique, biogaz, énergie océanique et les générateurs monophasés et triphasés. Les sources de production décentralisée les plus couramment utilisées sont le PV, l'éolien, la micro-hydroélectricité et le diesel.

Le tableau (1.4) présente certaines caractéristiques des sources de production d'électricité (DG).

Certains des avantages des sources de production décentralisée basées sur les énergies renouvelables sont les suivants :

- Sources d'énergie durables et naturelles.
- Impact positif sur l'environnement.
- Réduction de la consommation d'électricité provenant de sources conventionnelles.
- Réduire les émissions de GES.
- Durée de vie plus longue.
- Fonctionnement silencieux (sauf vent et électricité).

Ces sources de production décentralisée peuvent être utilisées efficacement dans un système de micro-réseau, mais elles présentent certains inconvénients :

- Coût d'installation élevé.
- Faible efficacité énergétique.
- Restriction à certaines zones géographiques et/ou conditions météorologiques.

**Tableau 1.4 :** Caractéristiques typiques des sources de production (DG).

Caractéristiques	Solaire photovoltaïque	éolienne	micro hydroélectricité	diesel
Disponibilité	Dépend de la localisation	Dépend de la localisation	Dépend de la localisation	A tout moment
la puissance produite	DC	AC	AC	AC
Emission GES	/	/	/	élevé
Contrôle	Incontrôlable	Incontrôlable	Incontrôlable	Contrôlable
Interface typique	Convertisseur (DC-DC-AC)	Convertisseur (AC-DC-AC)	Générateur synchrone ou asynchrone	/
Contrôle du flux de puissance	MPPT et contrôle de la tension continue DC	MPPT, contrôle du couple, pitch contrôle	Contrôlable	Contrôlable

**a. Problèmes de la qualité d'énergie (PQ) liés aux sources de production d'électricité (DG)**

La qualité d'énergie dans les micro-réseaux est devenue une question importante comme la pénétration des sources de production décentralisée, soit connectées au réseau, soit faisant partie d'un micro-réseau. L'énergie solaire, l'énergie éolienne, la micro-hydroélectricité et le diesel sont les principales sources de production décentralisée. Les problèmes de qualité d'énergie liés à ces sources de production ont été identifiés et sont présentés dans le tableau (1.5). Ce tableau montre que les systèmes d'énergie solaire photovoltaïque et éolienne des sources d'énergie renouvelables (SER) causent presque tous les problèmes de PQ tels que la chute de tension, la sur/sous tension, les harmoniques de tension et de courant, le papillotement (flicker). Comparativement au PV et à l'éolien, les micro-systèmes hydroélectriques ont moins de problèmes de qualité d'énergie. Les principaux avantages de ces RESs sont qu'elles ne sont pas polluantes.

La génératrice diesel conventionnelle a également moins de problèmes de qualité d'énergie, comme la chute ou la houle de tension, la surtension ou la sous-tension et le papillotement. Le principal inconvénient de cette source est qu'elle émet du CO<sub>2</sub> qui pollue l'environnement. Le tableau 1 montre que peu de bancs d'essai de micro-réseau ont mis en œuvre des dispositifs de qualité d'énergie dans leurs systèmes. En même temps, pour la stabilité et la fiabilité du système, le contrôle de la qualité du réseau, y compris la gestion des défaillances, est l'un des critères de base à prendre en considération et, par conséquent, il convient de mettre davantage l'accent sur l'amélioration de la qualité d'énergie dans les ressources (DG) et le micro-réseau.

**Tableau 1.5 :** les problèmes de la qualité d'énergie liés aux sources (DG) de production d'électricité.

Problèmes de la qualité d'énergie (PQ)	éolienne	Solaire photovoltaïque	micro/petite hydroélectricité	diesel
creux de tension/ houle de tension	x		x	x
Surtension/ sous-tension	x			x
déséquilibre de tension		x		
tension transitoire	x			
harmonique de la tension	x	x	x	
Papillotement (Flicker)	x	x		x
harmonique du courant	x	x	x	
interruption	x	x		

### 1.4.2.2 Systèmes de communication

Pour le contrôle de puissance et la protection, les systèmes de communication sont très importants. Les méthodes de communication de base et leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau (1.6). Les avantages et les inconvénients de ces systèmes ainsi que le protocole ont été examinés en détail. Le tableau suivant montre que les systèmes de communication couramment utilisés dans les micro-réseaux sont GSM, GPRS, 3G, WiMax, PLC, ZigBee. Parmi les systèmes mentionnés, la 3G et le WiMax ont un taux de transfert de données rapide et une longue portée. Mais la limite est que les frais de spectre sont coûteux. Dans les systèmes de communication PLC, les débits de données sont de l'ordre de 2-3 Mbps et la couverture varie entre 1 et 3 km. Pour la communication longue distance, le WiMax et la 3G sont utilisés et pour la communication courte distance, les systèmes PLC et Zig Bee sont préférables.

**Tableau 1.6 :** différents systèmes de communication applicables dans les micro-réseaux.

Technologie	Spectre	Débit de données	Plage de couverture	Limitations
GSM	900–1800MHz	Upto14.4Kpbs	1–10km	faibles débits de données
GPRS	900–1800MHz	Upto170Kpbs	1–10km	faibles débits de données
3G	1.92–1.98GHz 2.11–2.17GHz	384 kbps to 2 Mbps	1–10km	Frais d'utilisation du spectre coûteux
WiMax	2.5, 3.5, 5.8 GHz	Upto75Mbps	10–50 km	peu répandu
PLC	1–30 MHz	2–3 Mbps	1–3 km	Un canal dur et bruyant
Zig Bee	2.4 GHz - 868-915MHz	250kbps	30–50 m	faible débit de données, courte distance de transmission

## 1.5 Rendre les réseaux électriques intelligents

Les réseaux électriques intelligents, ou Smart grid, sont communicants car ils intègrent des fonctionnalités issues des technologies de l'information et de la communication. Cette communication entre les différents points des réseaux permet de prendre en compte les actions des différents acteurs du système électrique, et notamment des consommateurs. L'objectif est d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande à tout instant avec une réactivité et une fiabilité accrues et d'optimiser le fonctionnement des réseaux. Le système électrique passe d'une chaîne qui fonctionne linéairement à un système où l'ensemble des acteurs est en interaction. Rendre les réseaux électriques intelligents consiste donc en grande partie à les instrumenter pour les rendre communicants. Actuellement le réseau de transport est déjà instrumenté notamment pour des raisons de sécurité d'approvisionnement. En revanche, les réseaux de distribution sont faiblement dotés en technologies de la communication, en raison du nombre très important d'ouvrages (postes, lignes, etc.) et de consommateurs raccordés à ces réseaux. L'enjeu des Smart grids se situe donc principalement au niveau des réseaux de distribution.

**Tableau 1.7 :** Comparaison entre les réseaux électriques classiques et les réseaux électriques intelligents.

Caractéristiques des réseaux électriques actuels	Caractéristiques des réseaux électriques intelligents
Électromécanique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie des réseaux	Communicant sur l'ensemble des réseaux
Peu de capteurs	Capteurs partout
Surveillance manuelle	Auto-surveillance
Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre/ production	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande/consommation
Défaillances et black-outs	Adaptation et îlotage
Consommateur	Consommateur

### 1.5.1 L'architecture du système électrique intelligent

L'architecture des réseaux intelligents se compose de trois niveaux :

- ✓ le premier sert à acheminer l'électricité par une infrastructure classique d'ouvrages électriques (lignes, transformateurs, etc.) ;
- ✓ le deuxième niveau est formé par une architecture de communication fondée sur différents supports et technologies de communication (fibre optique, GPRS, CPL, etc.) servant à collecter les données issues des capteurs installés sur les réseaux électriques ;

- ✓ le troisième niveau est constitué d'applications et de services, tels que des systèmes de dépannage à distance ou des programmes automatiques de réponse à la demande d'électricité utilisant une information en temps réel.

## **1.6 Conclusion**

Le secteur de l'électricité contribue à la croissance économique depuis de nombreuses années. Le développement d'un réseau électrique moderne requiert la participation active de nombreux intervenants, des compagnies d'électricité et des producteurs, mais également d'acteurs provenant du secteur des transports, de l'industrie du bâtiment et les télécommunications. Les universités, les centres de recherche et les organisations, jouent également un rôle clé dans le développement de réseaux électriques plus intelligents.

Le développement de la technologie des smart grid génère beaucoup d'espérance pour arriver à gérer au mieux les nouveaux objectifs climatiques (réduction des émissions), énergétiques (gestion des périodes de pointe de consommation électrique, de l'efficacité énergétique), concurrentiels, de sécurité des systèmes et technologiques (insertion des énergies renouvelables, des stockages et des véhicules électriques dans les systèmes électriques).

# **C H A P I T R E 2**

**Energie solaire (photovoltaïque  
et thermique)**

## 2.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot " photovoltaïque " vient de la grecque " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la "lumière électricité".

Au cours de ces dix derniers années le spectre solaire à été homologués par l'organisation international de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000W/m<sup>2</sup>. Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui a une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.).

## 2.2 Déclinaison du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, sa valeur en degré est donnée par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284+j}{365} \right) \right] \quad (2.1)$$

Où  $j$  : est le numéro d'ordre du jour de l'année (n=1 pour le 1<sup>er</sup> Janvier, n=32 pour le 1<sup>er</sup> Février,...etc.)

La déclinaison varie entre -23,45° le 21 décembre et +23,45° le 21 juin.

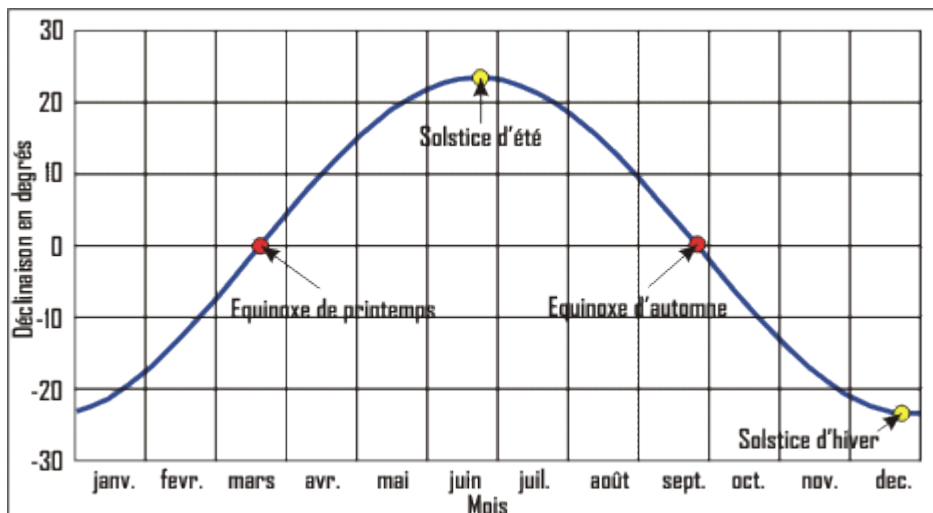


Figure (2.1) : Courbe de déclinaison du soleil.



## 2.3 Rayonnement solaire

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature.

### ➤ Le rayonnement direct

La conversion du rayonnement direct (ED) est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

### ➤ Le rayonnement diffus

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

### ➤ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo ( $\xi$ ):

$$0 \leq \xi \leq 1$$

Il dépend de l'environnement du site, cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

### ➤ Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

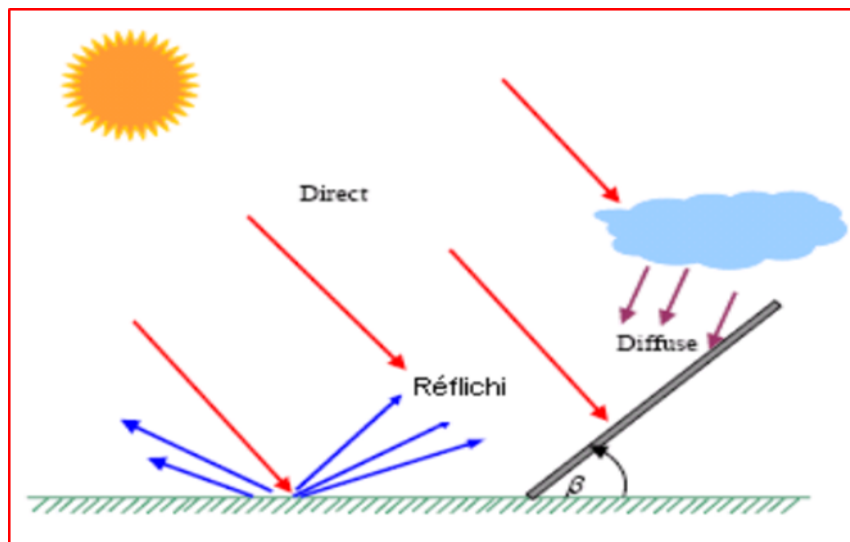


Figure (2.2) : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

### 2.3.1 Modèle simple de l'éclairement

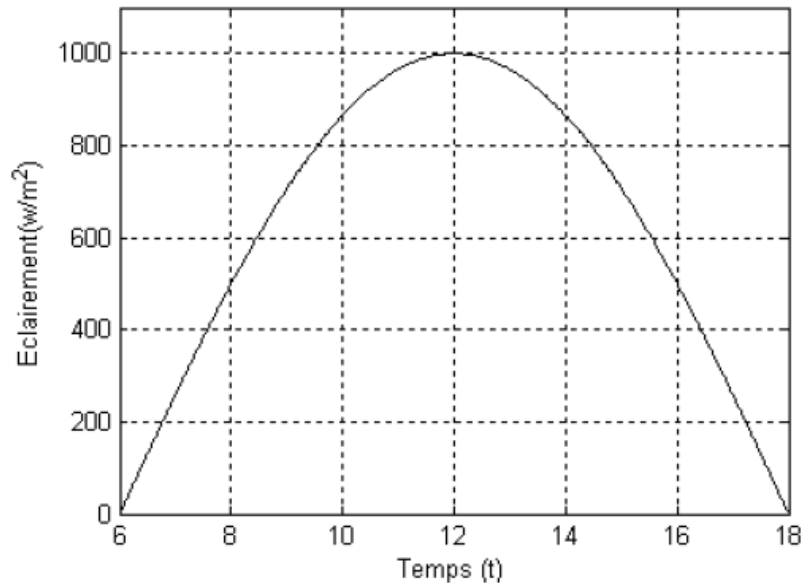
La quantification de l'éclairement incident pour une journée est donnée par une expression mathématique qui s'écrit comme suit :

$$E = E_m \sin \left[ \frac{\pi(t-t_0)}{12} \right] \quad (2.2)$$

$E_m$  : L'éclairement maximal du site ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$t$  : Temps solaire en heure.

$t_0$  : temps de la levée du soleil ( $6^{\text{h}}$ ).



**Figure (2.3) :** Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps.

## 2.4 L'Énergie solaire photovoltaïque

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité. Son utilisation est si étendue, qu'aujourd'hui on pourrait difficilement concevoir une société techniquement avancée qui n'en fasse pas usage. Des milliers d'appareils sont dessinés pour fonctionner grâce à l'énergie électrique, soit sous forme de courant continu de faible tension, soit à partir d'un courant alternatif de tension plus élevée. Il est très intéressant de produire de l'électricité avec une source d'énergie sûre et pas polluante, comme l'énergie solaire.

Il existe deux méthodes pour pouvoir convertir l'énergie solaire en électricité, selon qu'on utilise l'énergie cinétique comme forme intermédiaire du procès de conversion :

- ✓ Systèmes de conversion thermodynamique
- ✓ Systèmes directs, fondés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation incidente et les électrons du matériau, l'effet photovoltaïque.

### 2.4.1 Principe de fonctionnement

Les modules photovoltaïques produisent de l'électricité à partir de l'ensoleillement (les photons de la lumière du soleil), il ne faut donc pas les confondre avec les panneaux solaires thermiques qui produisent de la chaleur transmise par un fluide caloporteur.



a) Capteur solaire thermique



b) Capteur solaire photovoltaïque

**Figure (2.4)** : les capteurs solaires thermique et photovoltaïque.

Actuellement, il existe essentiellement deux technologies en photovoltaïque : le silicium mono ou poly cristallin (technologie dite de première génération) et le silicium amorphe. D'autres technologies sont en phase de début de commercialisation ou de recherche : Silicium cristallin couche mince, Cuivre-Indium-Sélénium (CIS), Tellurure de Cadmium (CdTe) (technologies dites de deuxième génération, avec le silicium amorphe) et cellules organiques, cellules de Grätzel et cellule multi-jonction (technologies dites de troisième génération).

### 2.4.2 L'effet photovoltaïque

L'effet photoélectrique a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Il est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur, lequel génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. Le rayonnement solaire est constitué de photons dont l'énergie est décrite par la relation suivante :

$$E [J] = h\nu = h \cdot c/\lambda \quad (2.3)$$

Avec,  $h$  : constante de Planck. ( $6,62607004 \times 10^{-34}$  J. s)

$\lambda$  : longueur d'onde [m].

$\nu$  : fréquence [Hz]. Où  $c$  : la vitesse de la lumière.

Quand un photon heurte la cellule, il transmet son énergie aux électrons des semi-conducteurs. Si l'énergie absorbée est suffisante pour permettre le passage de la bande interdite ( $h\nu > E_{\text{gap}} = E_{\text{conduction}} - E_{\text{valence}}$ ), ces électrons quittent leur bande de valence et entrent dans la bande dite de conduction. Cette émission d'électrons et des trous correspondants (on parle de paires électron-trou) due à l'action de la lumière est appelée effet photoélectrique interne (car les électrons ne sont pas éjectés en dehors de l'atome). Les propriétés physiques du matériau sont alors modifiées

et celui-ci devient conducteur (photoconductivité). Si à l'inverse l'énergie du photon n'est pas suffisante, il traverse le matériau sans transmettre d'énergie.

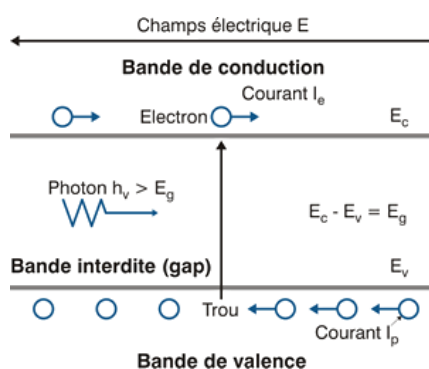


Figure (2.5): l'effet photoélectrique.

Ainsi, un matériau semi-conducteur dont la bande interdite est comprise entre 0.7 et 0.4eV est un matériau dit photovoltaïque du spectre solaire. Le défi est de récupérer la paire électron-trou ainsi générée, car si celle-ci n'est pas récupérée suffisamment rapidement il y a recombinaison entre l'électron et le trou. Pour pouvoir valoriser le potentiel électrique de cet effet, on utilisera la différence de potentiel induite par une jonction PN.

La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26%, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montent pas au-dessus de 17%, Ces valeur, impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité.

### 2.4.3 Les différents types d'installations solaires photovoltaïques

Il existe trois types d'installations des systèmes photovoltaïques :

- ✓ Autonome,
- ✓ Connectée au réseau,
- ✓ Hybride,

Un panneau photovoltaïque, ou module solaire photovoltaïque, est un générateur de courant continu (DC) constitué de cellules photovoltaïques - les piles solaires - reliées entre elles en fonction de la puissance recherchée. Une cellule a une apparence lustrée, gris-bleutée ou noire, selon la technologie. Une installation photovoltaïque (PV) en site isolé est composée de quatre éléments principaux :

- ✓ le panneau solaire, dont le rôle est de délivrer l'énergie à la charge, ainsi qu'à la batterie.
- ✓ la batterie, dont le rôle est de stocker l'énergie et de la restituer lorsque l'ensoleillement est insuffisant.
- ✓ le régulateur, dont le rôle est de réguler la charge et la décharge de la batterie.
- ✓ l'onduleur, dont le rôle est d'assurer la conversion continu-alternatif. Il permet d'alimenter les récepteurs en courant alternatif à partir du courant continu.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du système, il est nécessaire de connaître la structure technologique et le fonctionnement de chacun de ces éléments.

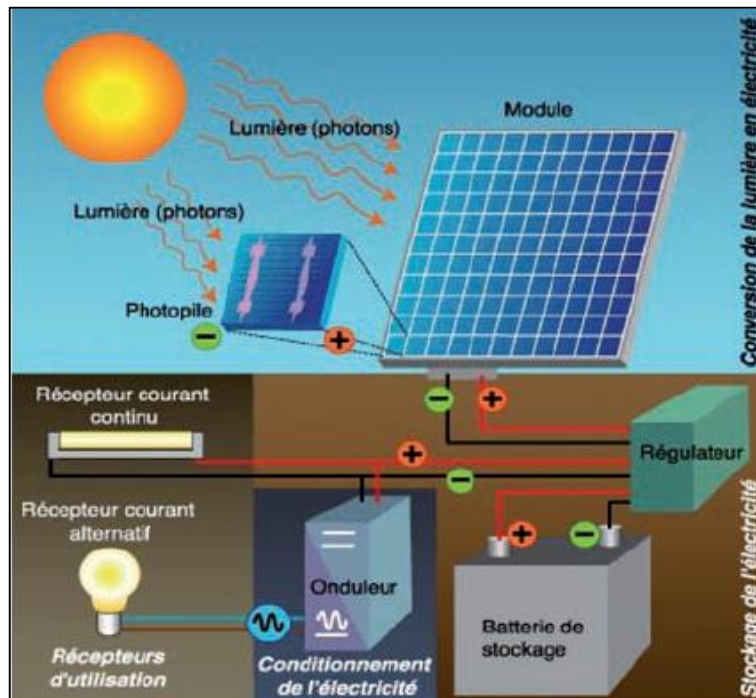


Figure (2.6) : une installation photovoltaïque en site isolé.

#### 2.4.4 Influence de l'éclairement

L'effet du rayonnement lorsqu'il fournit assez d'énergie (si celle-ci est supérieure à la largeur de la bande interdite) fait apparaître des paires supplémentaires d'électron trou porteur (apparition simultanée d'un porteur n et d'un porteur p) dans la jonction. Les porteurs p ainsi créés ont tendance à migrer vers le matériau p et les porteurs n vers le matériau n, renforçant la barrière de potentiel. Une partie des porteurs générés par le rayonnement sera elle aussi soumise à divers phénomènes de recombinaison (disparition simultanée d'un porteur n et d'un porteur p).

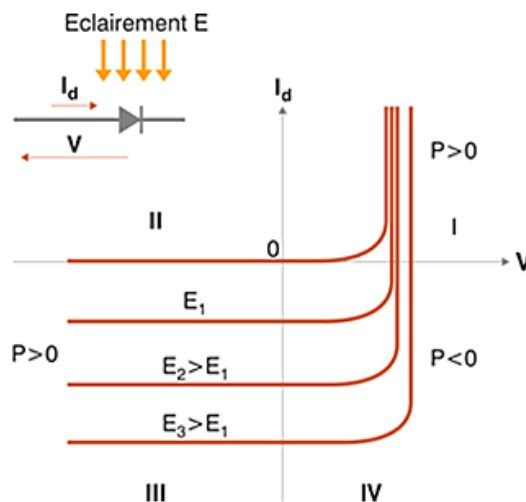


Figure (2.7) : Influence de l'éclairement.

L'éclairement a deux effets sur le fonctionnement :

- ✓ Si le système fonctionne en mode récepteur (quadrant III) : la résistance diminue avec l'éclairement, c'est la photorésistance.
- ✓ Si le système fonctionne en mode générateur (quadrant IV) : le courant "court-circuit" est proportionnel à l'éclairement et la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe. C'est la cellule photovoltaïque à jonction PN. C'est sur ce quadrant IV que sont basées les caractéristiques des cellules.

### 2.4.5 Le panneau solaire

#### a- Le module photovoltaïque

Un panneau solaire est constitué d'un assemblage en série de cellules individuelles en capsulées dans un support unique (figure (2.8)). Le nombre de cellules fixe la tension nominale (pour un module comportant de 16 à 20 cellules, la tension nominale est de 6V ; de 32 à 40 cellules, 12 V), alors que la taille des cellules impose le courant maximale (une cellule de 5cm × 5cm délivre 600mA, de 11cm × 11cm, 2,5A). Les cellules individuelles constituant le module étant interconnectées en série, les tensions et courants qui en résultent suivent les lois des générateurs à courant continu. Le courant de sortie et par voie de conséquence la puissance sont proportionnels à la surface du module.



**Figure (2.8) :** module photovoltaïque.

#### b- La cellule

Une cellule est constituée d'un empilage de couches (figure (2.9)) :

- ✓ Verre de protection.
- ✓ Couche antireflet.
- ✓ Maille conductrice (cathode).
- ✓ Silicium dopé N (négatif).
- ✓ Jonction N/P.
- ✓ Silicium dopé P (positif).
- ✓ Support métallique (anode).

Le fonctionnement qualitatif d'une cellule est assez simple : les photons (particules de lumières) frappent la cellule, ils transfèrent leur énergie aux électrons du silicium. Le silicium est traité (dopé) de manière que tous les électrons se dirigent dans le même sens, vers la grille métallique du dessus, créant ainsi un courant électrique continu dont l'intensité est fonction de l'ensoleillement.

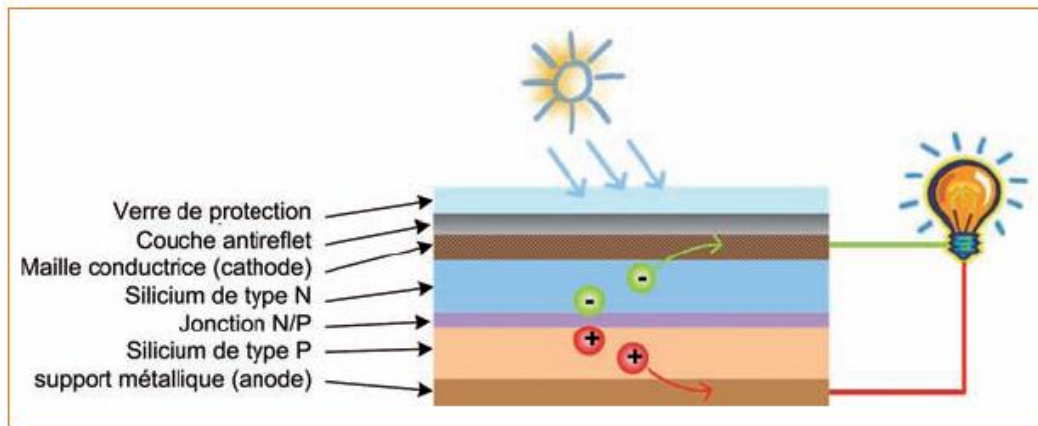
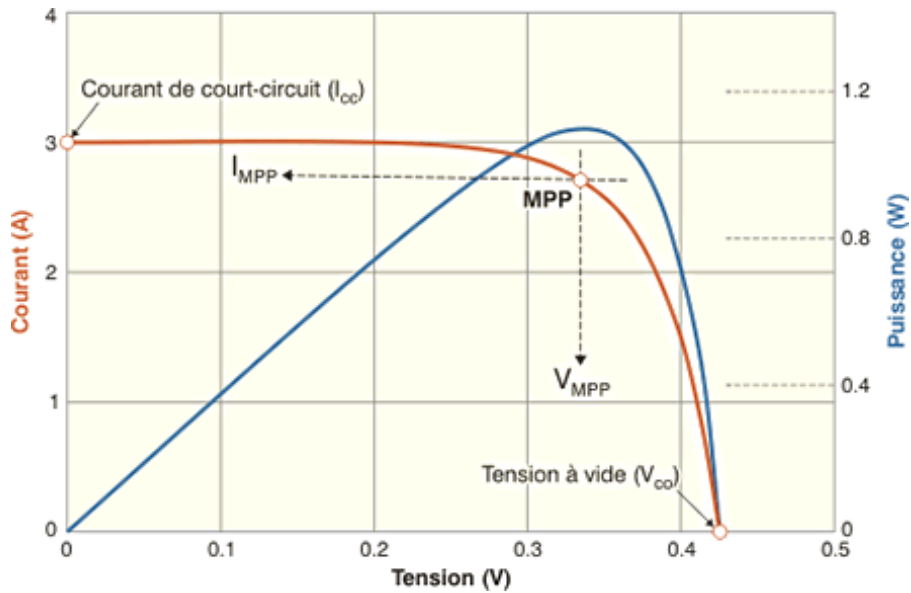


Figure (2.9) : les quatre couches d'une cellule solaire.

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe (figure (2.10)):

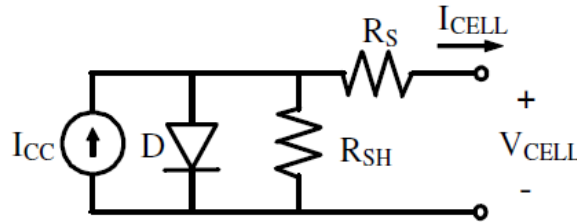
- ✓ Sa tension à vide **V<sub>co</sub>** : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- ✓ Son courant court-circuit **I<sub>cc</sub>** : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- ✓ Son point de puissance maximal **MPP** : (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  : (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ )

Remarque : Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de  $1000 \text{ W/m}^2$ , température de  $25^\circ\text{C}$ , conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de  $41.8^\circ$  par rapport à l'horizontale).



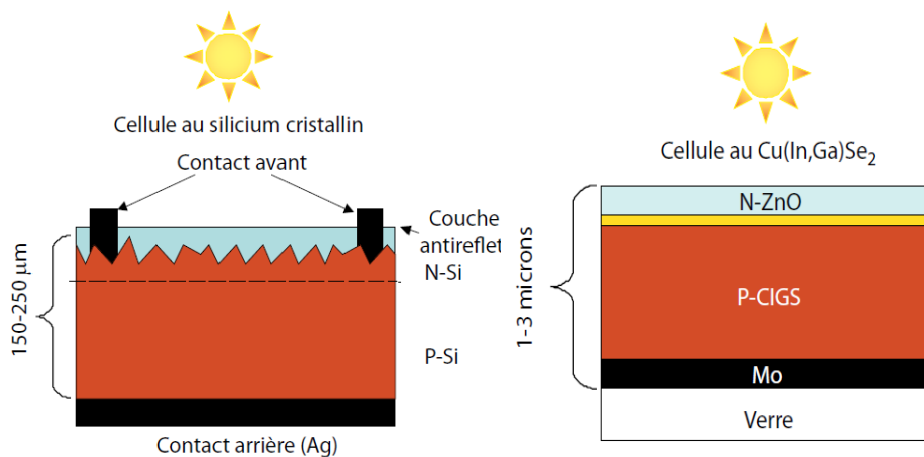
**Figure (2.10) :** la courbe  $I=f(V)$  représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5V-3.5A-2.1 Wc. Chaque cellule peut être modélisée par le schéma électrique équivalent comme représente la figure suivante :



**Figure (2.11) :** Schéma équivalent électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances  $R_S$  et  $R_{SH}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication  $R_S$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{SH}$  caractérise les courants de fuite de la diode et aux effets de bord de la jonction.





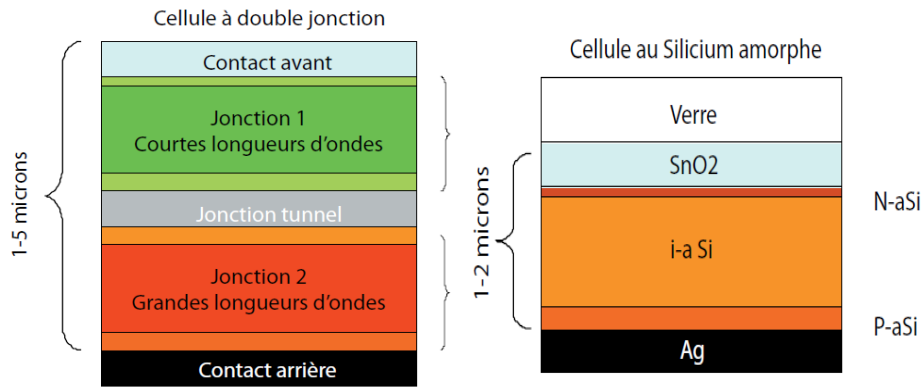


Figure (2.12) : les différents types des cellules.

**c- Raccordement des cellules entre elles**

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm<sup>2</sup> (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules. Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

✓ **Association en série**

Par association en série, les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

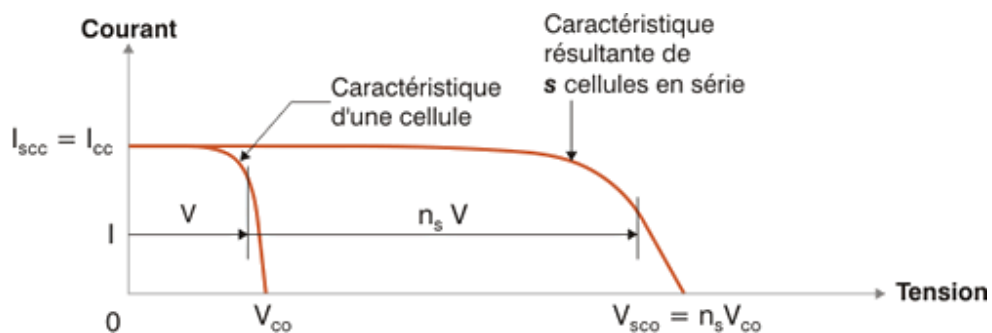


Figure (2.13) : association en série.

✓ Association en parallèle

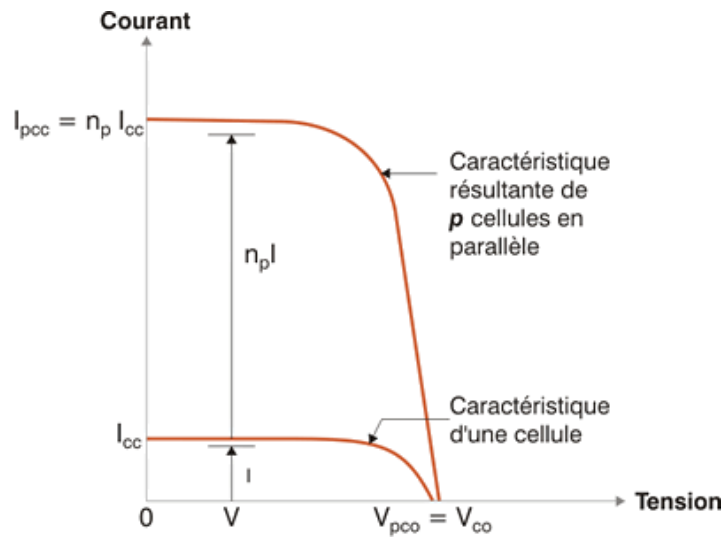


Figure (2.14) : association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des  $n_s * n_p$ .

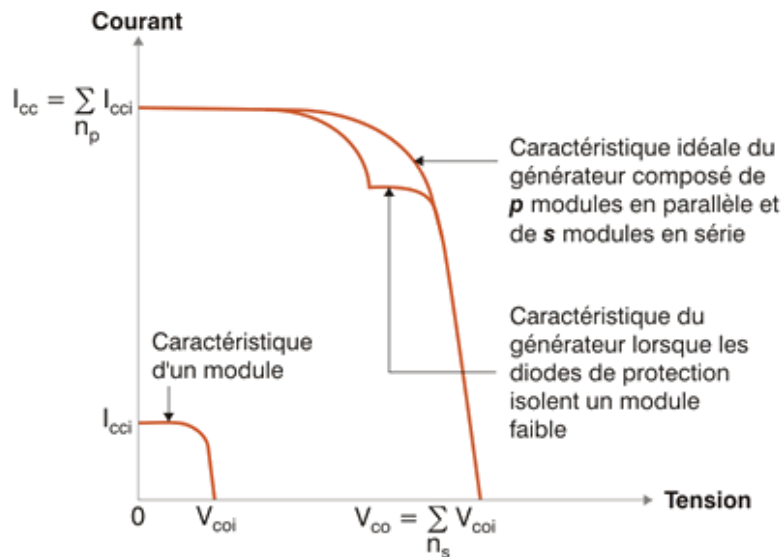


Figure (2.15) : association série parallèle.

## 2.4.6 Protection des systèmes photovoltaïque

### a- Les diodes de by-pass

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,...).

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série.

Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent.

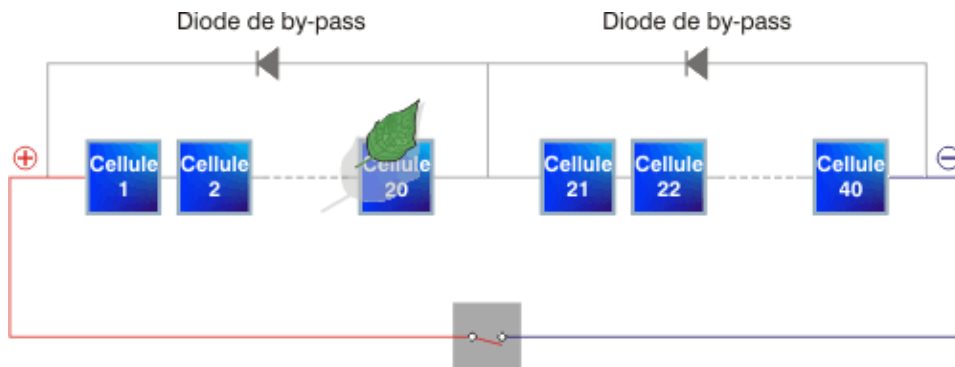


Figure (2.16) : la protection par les diodes by-pass.

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module :

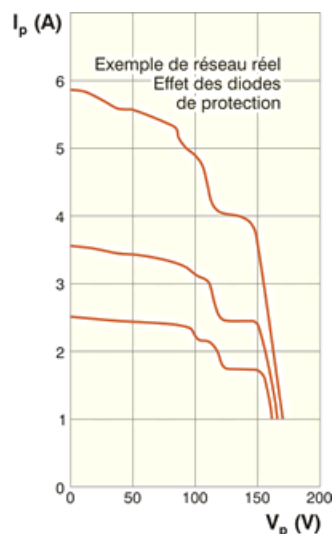


Figure (2.17) : les effets des diodes de protection.

Pour ne pas induire inutilement ces pertes, il est donc très important que ces diodes de by-pass soient utilisées et placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module.

**b- La diode anti-retour**

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les générateurs photovoltaïques. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

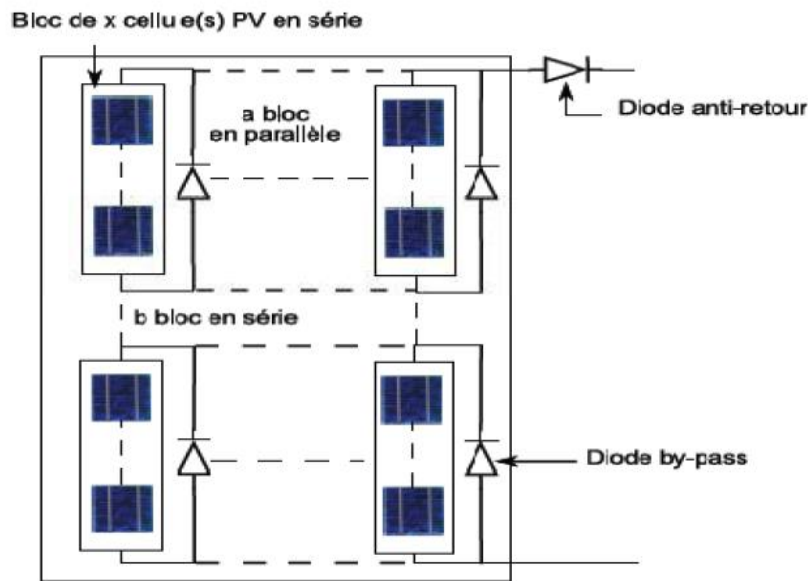


Figure (2.18) : la protection d'une cellule solaire par les diodes by-pass et anti-retour.

**2.4.7 Les caractéristiques courant-tension**

Une cellule génère du courant continu en fonction de la tension. La caractéristique  $I=f(V)$  dépend principalement de deux paramètres : l'éclairement (E) et la température de la jonction de la cellule ( $T_j$ ) (figure (2.19)).

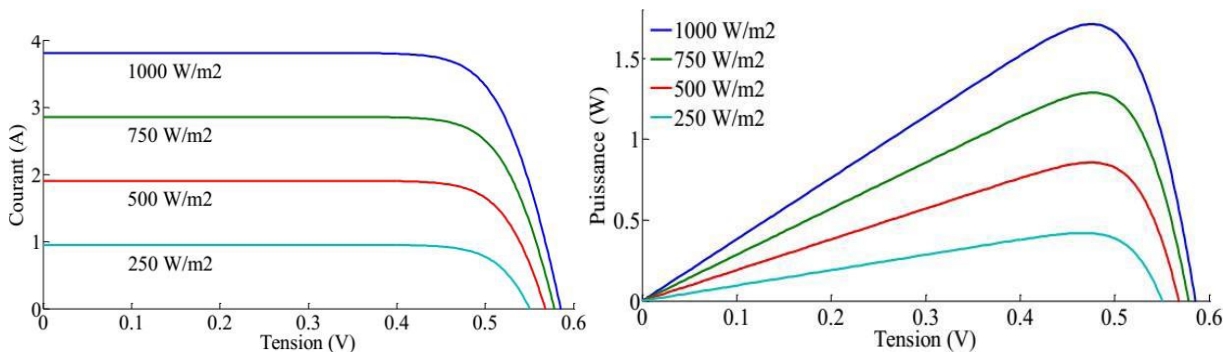


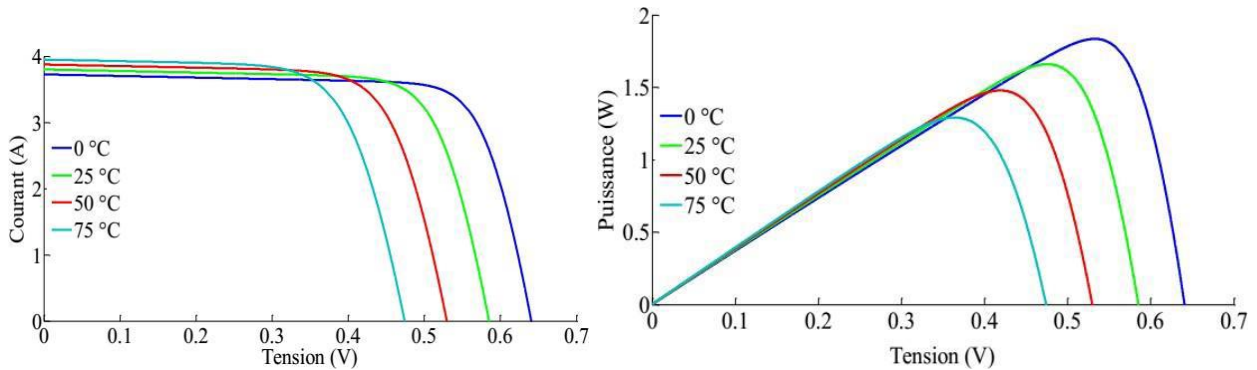
Figure (2.19) : L'influence de l'éclairement sur les courbes caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un module photovoltaïque.

**a- La puissance crête (Pc)**

En photovoltaïque, la puissance crête (Pc) désigne la puissance mesurée aux bornes d'une cellule photovoltaïque dans les conditions de test standard : E=1000W/m<sup>2</sup> ; AM=1,5 ; Tj=+25°C. Pc (où Wc) est donc la puissance théorique (P=U.I) exprimée en watts que peut produire un module photovoltaïque.

**b- L'influence de la température sur le fonctionnement**

La température a des effets importants sur une cellule. Lorsque la température augmente, la puissance diminue, le courant augmente légèrement, mais la tension décroît (de l'ordre de 0,0023V/°C pour le silicium) (figure (2.20)).



**Figure (2.20) :** L'influence de la température d'un module photovoltaïque sur ses courbes caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ .

**2.4.8 Les technologies**

Différents types de silicium sont utilisés pour la fabrication des cellules : Monocristallin, poly cristallin, amorphe.

**a- Le silicium monocristallin**

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres (figure (2.21)). C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12% et 16%. L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et énergivore. Il est utilisé en extérieur pour les fortes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications...).



**Figure (2.21) :** Des cellules de silicium monocristallin.

***b- Le silicium polycristallin***

Les cellules de silicium polycristallin sont découpées dans des barres de silicium reconstitué, les atomes ne sont pas tous cristallisés. Le rendement est moins bon, entre 11% et 14%. L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix, puisque leur fabrication, produisant peu de déchets, nécessite de 2 à 3 fois moins d'énergie et est plus rapide. Elles ont les mêmes applications que les cellules en silicium monocristallin (figure (2.22)).



**Figure (2.22) :** Des cellules de silicium polycristallin.

***c- Le silicium amorphe***

Ce silicium est nettement moins puissant que les deux précédents, car les atomes sont disposés de manière désordonnée du fait que les cellules sont fabriquées par projection de silicium sur un autre matériau, comme du verre ou du plastique (figure (2.23)). Ce silicium en couche très mince répond néanmoins à de nombreux besoins liés à l'éclairage (extérieur ou intérieur). Son rendement est de 5% à 7%. Il est utilisé pour l'électronique, dans les calculettes par exemple.



**Figure (2.23) :** Des cellules de silicium amorphe.

## 2.4.9 Les paramètres des panneaux solaires

Les paramètres à prendre en compte pour le choix des panneaux solaires sont les suivants :

***a. Paramètres électriques***

- ✓ Puissance crête  $P_c$  (en Wc)

- ✓ Tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (à vide), de 18 à 22V pour un panneau de 12V.
- ✓ Tension en charge.
- ✓ Courant maximal de sortie. (qui dépend de l'ensoleillement)
- ✓ Courant de court-circuit  $I_{cc}$  (en A).

**b. Paramètres physiques**

- ✓ Nombre de cellules
- ✓ Température d'utilisation (de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+80^{\circ}\text{C}$ )
- ✓ Poids et dimensions
- ✓ Durée de vie
- ✓ Coût

## 2.5 La batterie

### 2.5.1 Son rôle

La batterie sert à stocker l'énergie électrique excédentaire produite par les panneaux solaires. Cette énergie est stockée sous forme chimique. La nuit, c'est la batterie qui fournit l'énergie. Le stockage est dimensionné pour une durée de plusieurs jours consécutifs sans soleil, permettant d'avoir une large plage de secours, prenant ainsi en compte les phénomènes de durée de vie et de perte de capacité liée au cyclage (charge et décharge).

### 2.5.2 Sa capacité

La capacité représente la quantité d'électricité que la batterie peut délivrer pendant une période donnée, sous un régime de décharge et une température ambiante donnée. La capacité diminue à basse température, à fort taux de décharge et avec le vieillissement. Cette capacité s'exprime en Ah (ampères-heures).

La norme internationale définit de la façon suivante la capacité nominale d'un accumulateur au plomb : La capacité  $C_{20}$  est la valeur obtenue en ampères-heures lors de la décharge continue et ininterrompue pendant 20 heures jusqu'à une tension de fin de décharge de 1,75V par élément à  $20^{\circ}\text{C}$ . L'intensité nominale correspond à 1/20 de la capacité en ampères-heures.

#### Exemple de calcul de l'intensité nominale :

Batterie de capacité  $C_{20}=12\text{Ah}$ .

Intensité = capacité / temps de décharge.

$I=12/20=0,6\text{A}$  pendant 20 heures.

## 2.6 Le régulateur

### 2.6.1 Son rôle

Le régulateur a pour fonction de gérer la charge et la décharge de la batterie. Il permet un transfert optimal d'énergie entre le générateur solaire et la batterie tout en minimalisant la profondeur de décharge et en protégeant la batterie de la surcharge, qui provoquerait un vieillissement prématuré.

### 2.6.3 Ses caractéristiques

Le régulateur possède en général plusieurs caractéristiques techniques :

- ✓ Protection contre les inversions de polarités (panneau solaire ou batterie).
- ✓ Diode anti-retour intégré (évite le retour du courant vers le générateur).
- ✓ Fonction alarme tension en cas de tension de batterie trop basse.
- ✓ Visualisation des états de charge par leds.
- ✓ Protection contre la foudre, les courts-circuits.
- ✓ Afficheur de la tension de la batterie et des courants de charge et de décharge.

Le choix s'effectue en général en fonction de la tension et du courant maximal venant des panneaux solaires.

## 2.7 L'onduleur

### 2.7.1 Son rôle

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif qui transforme la tension du bus continu en tension alternatif. En site isolé, l'onduleur permet d'alimenter des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. On utilise actuellement des onduleurs ayant un signal de sortie alternatif quasi sinusoïdal.

En site non isolé, on peut utiliser un onduleur pour renvoyer de l'énergie sur le réseau. Dans ce cas, on utilise un onduleur sinusoïdal, qui coûte de 4 à 5 fois plus cher qu'un onduleur quasi sinusoïdal. La différence vient du fait que le signal est pur (forme sinusoïdale) et que pour arriver à ce niveau il a fallu employer des filtres.

### 2.7.2 Son schéma de principe

Le signal de sortie obtenu peut être quasi sinusoïdal comme montre le schéma suivant (figure (2.25)) :



Figure (2.25): onduleur quasi sinusoïdal.



Ou sinusoïdal (figure (2.26)) :

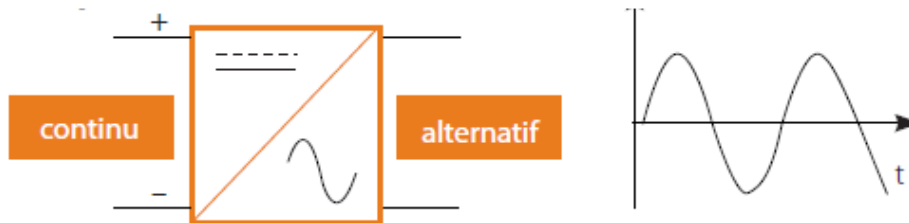


Figure (2.26) : onduleur sinusoïdal.

## 2.8 Une application d'installation autonome

### 2.8.1 Mise en situation

Pour les sites isolés (hors réseau), l'utilisation de panneaux photovoltaïques est très concurrentielle par rapport à l'extension du réseau. Nous proposons de décrire les étapes de dimensionnement d'une installation autonome en site isolé.

Dans un tel cas, l'énergie produite pendant la période ensoleillée doit être stockée afin de couvrir les besoins pendant la nuit. Le stockage étant assuré par une batterie au plomb, un régulateur de charge doit être installé pour la protéger contre les surcharges ou la décharge profonde. Il est également souhaitable de s'équiper d'un groupe électrogène et d'un chargeur de batterie pour pallier le manque de soleil sur une période assez longue.

#### a- Matériel nécessaire

- ✓ Panneaux solaires photovoltaïques
- ✓ Batterie d'accumulateurs
- ✓ Onduleur
- ✓ Régulateur de charge
- ✓ Chargeur de batterie

### 2.8.2 La durée de vie des équipements

#### a- Les panneaux solaires

Les fabricants de panneaux solaires de type cristallin garantissent une perte de rendement de l'ordre de 5% à 10% pour une durée de trente ans. Quant aux panneaux de type amorphe, leur durée de vie n'est pas aussi longue.

#### b- L'onduleur

Les appareils de nouvelle génération sont très fiables. D'après les fabricants, ils doivent tenir dix ans en moyenne avant leur première panne.

#### c- Le régulateur

Ce matériel est en général assez fiable. Sa durée de vie dépend généralement de l'utilisation des batteries.

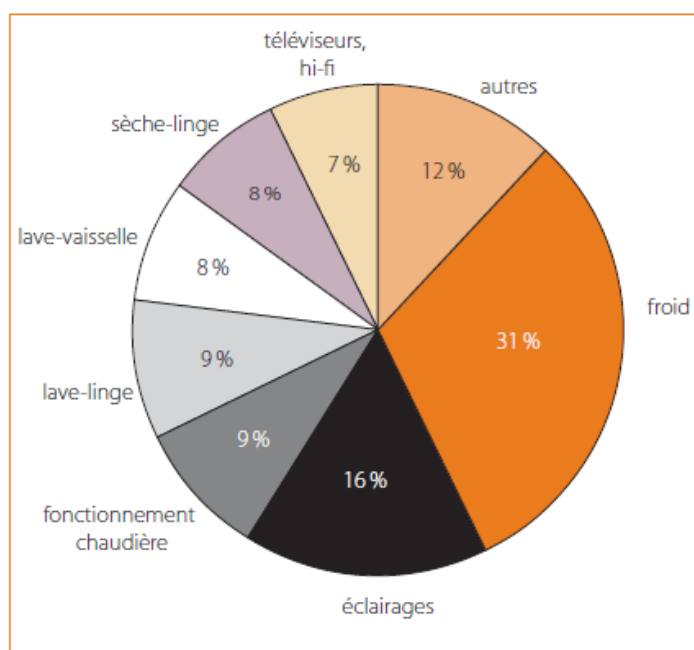
**d- La batterie**

La batterie est un gros investissement dans une installation solaire. C'est elle qui fournit l'énergie en cas d'ensoleillement moindre ou la nuit. Sa durée de vie en moyenne est de cinq ans.

**2.8.3 Le dimensionnement**

**a- Analyser ses besoins en électricité**

Dans un premier temps, il est nécessaire d'analyser ses besoins en électricité. Le plus simple pour connaître sa consommation annuelle est de faire la somme des kilowattheures facturés sur une année. Il est aussi possible de mesurer la consommation de chaque appareil, ce qui permet de savoir quels sont les plus gourmands en énergie et ainsi de gérer au mieux la production d'électricité. La répartition moyenne des consommations d'électricité dans une maison est présentée par le schéma suivant :



**Figure (2.28) :** La répartition moyenne des consommations dans l'habitat.

**b- Evaluer la production annuelle d'électricité**

La production annuelle d'électricité dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ l'ensoleillement annuel du site, qui peut être évalué assez précisément ;
- ✓ l'orientation. Le soleil ayant son point le plus haut au sud dans l'hémisphère Nord, c'est la meilleure orientation pour les panneaux ;
- ✓ l'inclinaison, qui est choisie en fonction de la hauteur du soleil pendant les mois ensoleillés pour une récupération optimale. En pratique, l'inclinaison est obtenue en prenant la latitude du lieu majoré de 10° ;
- ✓ le rendement de l'onduleur (de l'ordre de 90 %).

**c- Dimensionner la puissance des équipements**

✓ **Gisement solaire  $E_i$**

L'énergie solaire disponible est exprimée en Wh/m<sup>2</sup>/j ou en kWh/m<sup>2</sup>/j. Elle dépend de la localisation du site. En voici quelques valeurs indicatives :

$E_i = 6 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  : très ensoleillé (Koweït)

$E_i = 5 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  : ensoleillé (Buenos Aires)

$E_i = 4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  : moyen (Calcutta)

$E_i = 4 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  : couvert (Lyon)

$E_i = 3 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  : très couvert (New York)

✓ **Consommation journalière  $E_j$**

Elle dépend de la puissance des appareils et de leur durée d'utilisation. Elle est exprimée en Wh/j ou en kWh/j. C'est le produit de la puissance P (en W ou kW) par le temps T de fonctionnement journalier (en h/j) :  $E_j = P \cdot T$

**d- Dimensionnement solaire (panneau)**

La puissance crête  $P_c$  (en Wc ou kWc) des panneaux dépend des consommations, du gisement solaire et d'un coefficient de pertes au niveau des panneaux :

$$P_c = E_j / 0,6 E_i \quad (0,6 : \text{coefficient de pertes})$$

**e- Dimensionnement de la batterie (capacité)**

La capacité C (en Ah) dépend des consommations journalières, du nombre de jours d'autonomie, de la tension et du type de batteries utilisé :

$$C = N_j E_j / D_p V$$

V : tension de la batterie.

$D_p$  : coefficient de décharge profonde (0,8 pour les batteries solaires, 0,6 pour les batteries standard, 0,5 pour les batteries de voiture)

$N_j$  : nombre de jours d'autonomie. 5 pour les sites ensoleillés (Afrique, ...) de 7 à 10 pour les sites tempérés (Europe du Sud et France) de 15 à 20 pour les sites plus défavorables (Europe du Nord)

**f- Dimensionnement des protections et des sections des câbles**

On doit tenir compte du courant circulant dans l'installation, du courant de court-circuit, de la longueur de l'installation et de la tension (se référer à la norme NF C 15-100, UTE C 15-712).

**g- Des exemples de dimensionnement**

Les exemples suivants permettent de concrétiser la démarche de dimensionnement proposée.

**1<sup>er</sup> exemple** : L'alimentation d'une radio

Quel générateur (panneau solaire) faut-il pour alimenter une radio de 50 W sous 12 V fonctionnant 24 h / 24 à Lyon pour une autonomie de 7 jours avec une batterie solaire?

Gisement solaire  $E_i = 4 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$

Consommations journalières :

$$E_j = P T = 50 \times 24 = 1200 \text{ Wh} = 1,2 \text{ kWh}$$

Dimensionnement solaire :

$$P_c = E_j / (0,6 E_i) = 1,2 / (0,6 \times 4) = 0,5 \text{ kWc} = 500 \text{ Wc}$$

Capacité de la batterie :

$$C = (N_j E_j) / (d_p V) = (7 \times 1200) / (0,8 \times 12) = 875 \text{ Ah}$$

**2<sup>ème</sup> exemple :** L'alimentation d'un portail automatique

La puissance du moteur est de 120 W et la tension d'alimentation est de 12 V. La durée de fonctionnement est de 0,03 h. Le récepteur, d'une puissance de 0,48 W, est alimenté sous 12 V également. La durée de fonctionnement est de 24h/24. On désire une autonomie de 10 jours. Le portail est installé à Paris. La batterie est standard.

Le rayonnement solaire donne pour Paris avec inclinaison à  $60^\circ$  par rapport à l'horizontale en  $\text{kWh/m}^2/\text{j}$  :

Décembre : 1,12

Mars : 3,23

Juin : 4,43

Septembre : 3,98

Quel générateur et quelle batterie faut-il installer ?

Gisement solaire  $E_i = 1,12 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  (cas le plus défavorable)

Consommations journalières pour le moteur :

$$E_{jm} = P T = 120 \times 0,03 = 3,6 \text{ Wh/j}$$

Consommations journalières pour le récepteur:

$$E_{jr} = P T = 0,48 \times 24 = 11,52 \text{ Wh/j}$$

Consommations journalières pour l'ensemble:

$$E_j = E_{jm} + E_{jr} = 3,6 + 11,52 = 15,12 \text{ Wh/j}$$

Dimensionnement solaire :

$$P_c = E_j / (0,6 E_i) = 0,01512 / (0,6 \times 1,12) = 0,0225 \text{ kWc} = 22,5 \text{ Wc}$$

Capacité de la batterie :

$$C = (N_j E_j) / (D_p V) = (10 \times 15,12) / (0,6 \times 12) = 21,04 \text{ Ah}$$

**i- Le choix du matériel**

✓ **Les panneaux photovoltaïques**

Comme nous l'avons vu, il existe différents types de panneaux, avec des rendements variables. Actuellement, le meilleur compromis entre efficacité, fiabilité et prix doit être recherché du côté

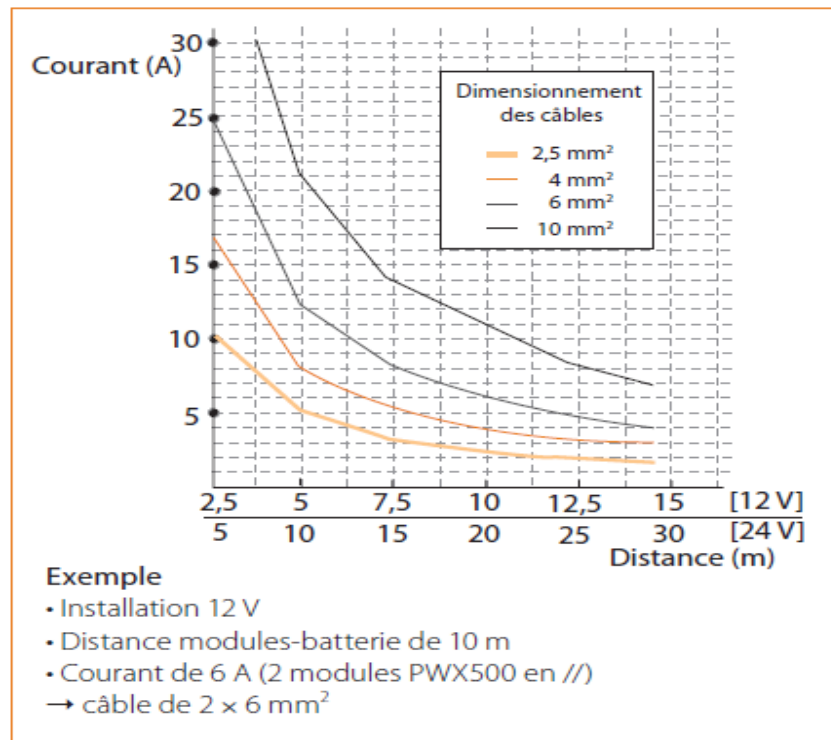
des modules cristallins. Outre la technologie, de nombreux paramètres peuvent influencer sur le choix des panneaux : opaques ou translucides, avec ou sans cadre aluminium, couleur...

D'autre part, des produits comme les tuiles ou les ardoises solaires s'intègrent plus facilement dans certaines constructions, mais avec un surcoût par rapport aux modules classiques qui peut s'élever jusqu'à 50 %.

✓ **Les éléments de connexion**

Une installation de panneaux photovoltaïques doit résister aux intempéries, c'est pourquoi les câbles électriques extérieurs doivent être à double isolation, résistants aux UV, et les connexions des différents éléments réalisées avec soin afin d'assurer une très bonne étanchéité. Les panneaux photovoltaïques produisent un courant élevé, les pertes dans les câbles peuvent donc être importantes. Pour les limiter, il faut faire attention aux points suivants :

- ✓ La section des câbles doit être correctement, calculée pour que les pertes ne dépassent pas 3% (figure (2.29)) (NF C 15-100).



**Figure (2.29) :** Le dimensionnement des câbles.

- ✓ Une disposition des panneaux en série sera préférable à une disposition en parallèle (figure (2.30)) ; elle augmentera la tension nominale, ce qui générera moins de pertes. Mais si un seul panneau est occulté ou défaillant, c'est la puissance de toute l'installation qui diminue.

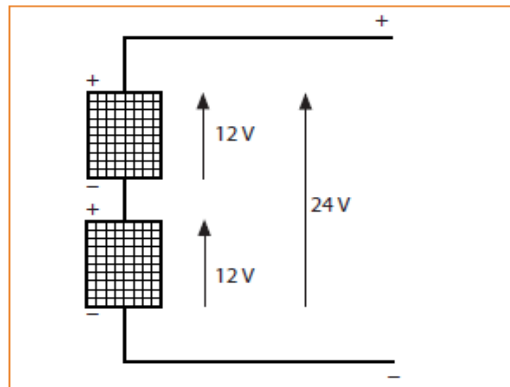


Figure (2.30) : Le raccordement de panneaux en série.

### ✓ *L'onduleur*

L'onduleur assume une fonction de liaison directe avec le réseau électrique, et il est susceptible de créer de graves dommages. Il doit donc répondre à des impératifs concernant la qualité du courant (tension, fréquence), de sécurité et de fiabilité. D'autres éléments doivent permettre de s'assurer de sa qualité :

- ✓ Le rendement doit être de 90% pour un fonctionnement à une puissance supérieure de 5% à la puissance nominale.
- ✓ Les paramètres internes doivent être réglables pour s'adapter au réseau électrique local et pouvoir être réajustés après quelques mois de fonctionnement.
- ✓ Une protection contre les surtensions venant par le réseau doit être prévue dans l'onduleur, car il s'agit de la principale cause de panne de cet appareil.

## 2.9 Energie solaire thermique

### 2.9.1 La conversion thermique

La conversion thermique de l'énergie solaire consiste à intercepter les photons incidents sur un matériau absorbant, dont la température s'échauffe.

Plusieurs modes de captation sont envisageables :

- ✚ **L'habitat solaire passif** : pour les applications au chauffage et à la climatisation des locaux, il est possible de concevoir l'architecture des bâtiments de telle sorte qu'ils optimisent naturellement ou « passivement » l'utilisation de la ressource solaire, sans faire appel à des fluides caloporteurs autres que l'air et à des dispositifs annexes de captation et de stockage. L'intérêt de la conception solaire passive des bâtiments est qu'elle peut conduire à des économies de chauffage substantielles avec des surcoûts faibles ;
- ✚ **Les capteurs plans** : utilisent généralement l'effet de serre pour limiter les déperditions thermiques de l'absorbeur. En effet, le verre est transparent pour le rayonnement visible, et laisse donc passer l'énergie solaire incidente, mais opaque pour le rayonnement infrarouge, ce qui a pour effet de piéger les calories absorbées. Selon les technologies employées, les

températures de fonctionnement des capteurs plans varient de 40 °C à 120 °C (capteurs sous vide). La figure (2.31) montre la vue en coupe d'un capteur plan. L'absorbeur est composé d'une plaque métallique sur laquelle sont soudées des canalisations dans lesquelles circule le fluide caloporteur. Les déperditions thermiques vers la face avant du capteur sont réduites par un ou plusieurs vitrages (deux sur la figure (2.31)) et celles vers l'arrière par un isolant.

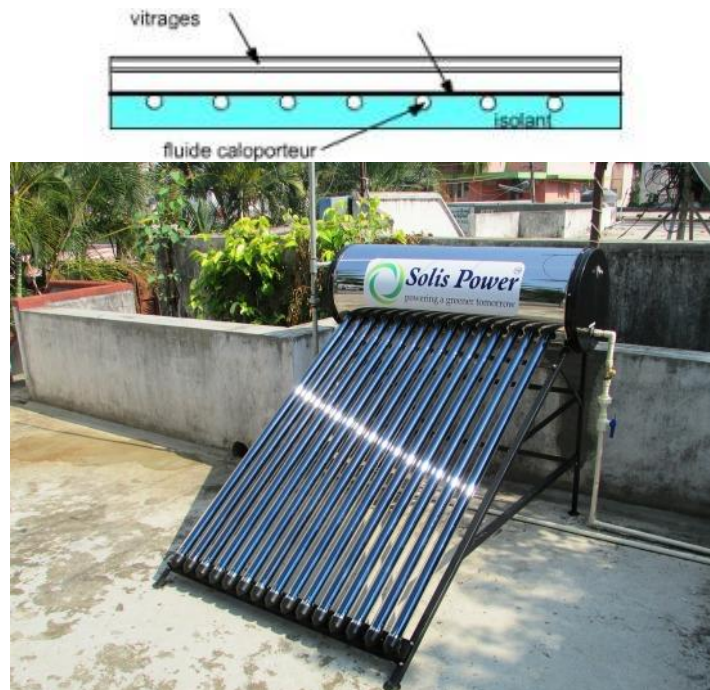


Figure (2.31) : Capteurs solaires sous vide.

- ✚ **Les capteurs à concentration** : pour atteindre des températures supérieures à environ 120°C, il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des jeux appropriés d'éléments réfléchissants (miroirs) ou de lentilles (généralement de Fresnel). La contrainte principale, outre le coût plus élevé des dispositifs, est le système de poursuite destiné à suivre le soleil dans sa course. Toute une série de concentrateurs a été proposée et développée ;
- ✚ **La conversion thermodynamique** de l'énergie solaire permet d'obtenir de l'électricité à partir d'un moteur thermique dont la source chaude reçoit sa chaleur de capteurs, généralement à concentration. Toutefois, les coûts de cette filière et les difficultés technologiques rencontrées limitent aujourd'hui son champ d'application.

### 2.10.2 Capteurs à concentration

L'expérience des trente dernières années montre que quatre principales technologies permettent en pratique de réaliser la concentration du rayonnement solaire dans des conditions techniques et économiques viables :

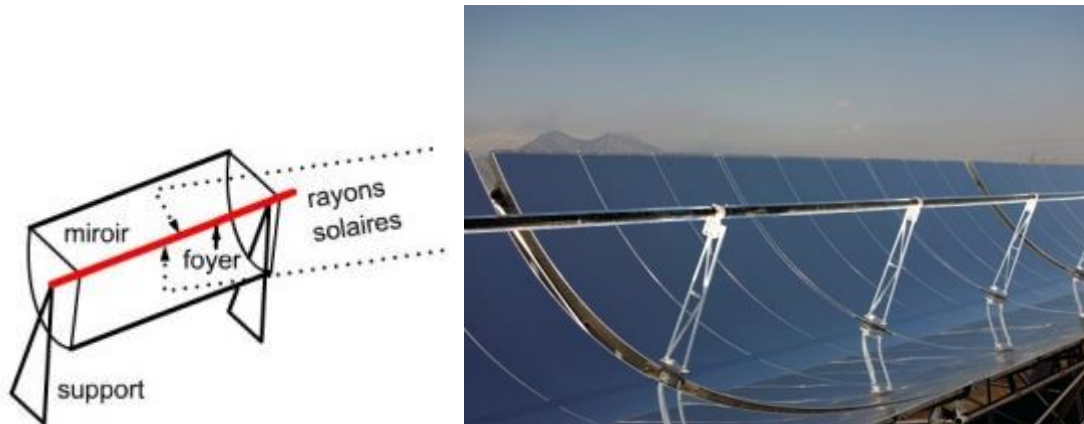
- ✓ Les capteurs cylindro-paraboliques ;
- ✓ Les concentrateurs à lentilles de Fresnel ;
- ✓ Les capteurs paraboliques ;



✓ Les centrales à tour.

Les premières technologies ne nécessitent de suivre le mouvement du soleil que selon une seule direction, mais la concentration, et donc la température de captation, sont plus faibles ( $400^{\circ}\text{C}$ ). Les deux autres nécessitent un double mouvement de poursuite, mais permettent d'atteindre des températures beaucoup plus élevées ( $750 - 1000^{\circ}\text{C}$ ).

Les capteurs cylindro-paraboliques (concentration  $C \approx 40-80$ , figure (2.32)) sont des cylindres de section droite parabolique, qui permettent de concentrer le rayonnement solaire sur un tube rectiligne.



**Figure (2.32) :** Concentrateur parabolique.

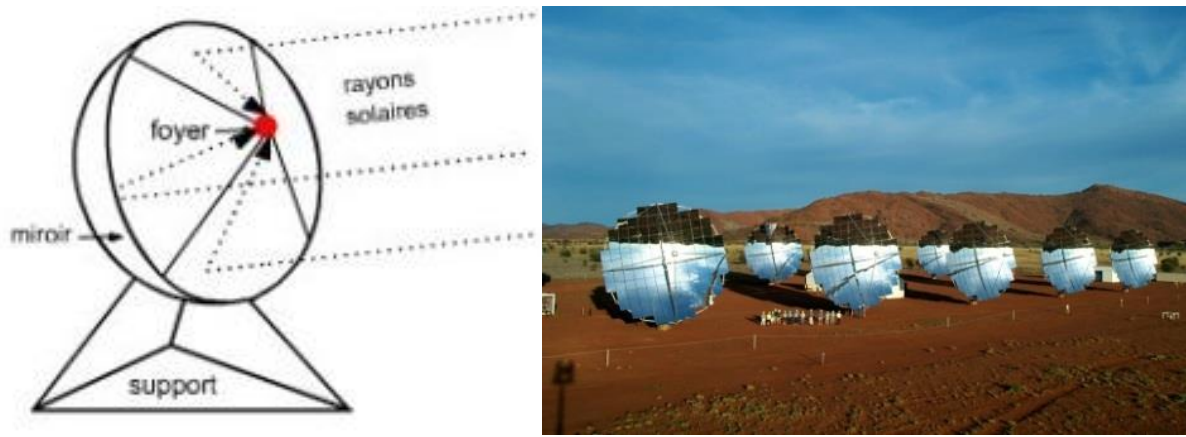
Les concentrateurs linéaires de Fresnel ou CLFR ( $C \approx 30$ , figure (2.33)) utilisent d'étroits miroirs plans rectangulaires pour concentrer la lumière solaire sur un absorbeur fixe constitué d'une série de tubes parallèles ;



**Figure (2.33) :** Concentrateur linéaire de Fresnel (AREVA Solar)

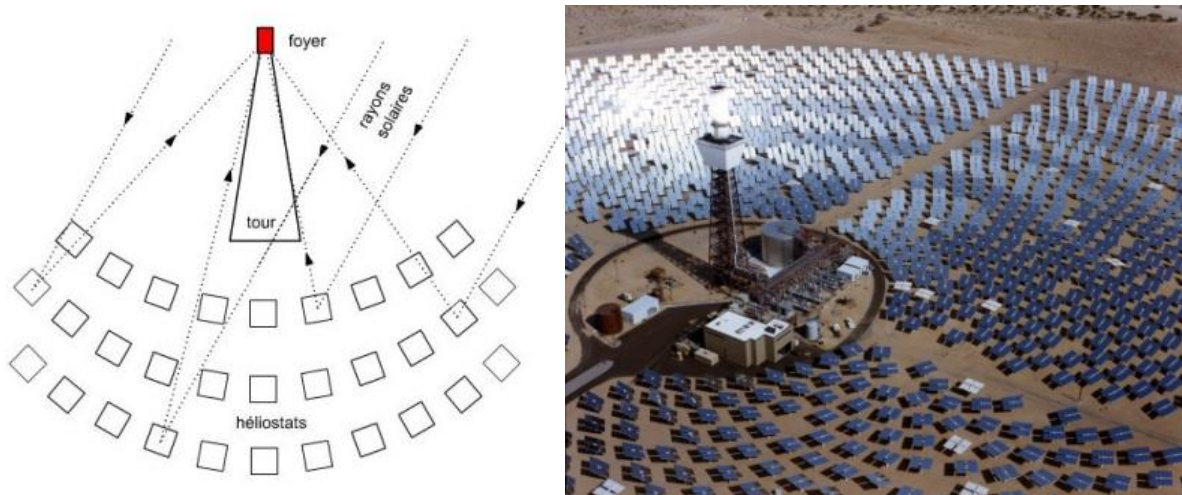
Dans les capteurs paraboliques ( $C \approx 1000-2500$ , figure (2.34)), le réflecteur est un paraboloïde de révolution.





**Figure (2.34) :** Capteurs paraboliques en Australie

Dans les centrales à tour ( $C \approx 200-700$ , figure (2.35)), des milliers de réflecteurs mobiles, appelés héliostats, redirigent le rayonnement solaire incident vers un absorbeur situé au sommet d'une tour, permettant ainsi d'obtenir à la fois de fortes concentrations et des puissances importantes.



**Figure (2.35) :** Centrale à tour, Solar One, Barstow, California

## 2.10 Conclusion

L'énergie provenant du Soleil pourrait donc combler les besoins de l'homme. Cependant les raisons économiques et politiques sont un frein à son exploitation et à son développement. En effet les pays susceptibles d'exploiter l'énergie solaire à grande échelle (les pays riches) seraient contraints d'installer leur exploitation dans les pays possédants le meilleur rayonnement solaire, c'est-à-dire dans les pays proche du Sahara. Malheureusement, l'instabilité politique qui règne dans ses pays rend une telle exploitation risquée. Pourtant, une solution devra être prise d'ici peu puisque selon les prévisions, en 2030 la demande mondiale énergétique sera un tiers plus importante qu'actuellement. Cependant il ne nous est pas encore possible de dire si l'énergie solaire sera capable de répondre à ces besoins, vu qu'à ce jour les rendements de cette énergie reste faibles. Des progrès devront donc être faits dans l'avenir pour que celle-ci puisse combler nos besoins énergétiques.

# **C H A P I T R E 3**

## **Energie éolienne**

### 3.1 Introduction

L'énergie éolienne est employée depuis longtemps dans les fermes pour rectifier les grains ou puiser l'eau de pompe, grâce aux moulins à vent. Le principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ce principe est appliqué à l'énergie éolienne dans le système d'alimentation. Une turbine de vent capture l'énergie cinétique de l'air débordant et la transforme en énergie mécanique. Un générateur installé dans la turbine du vent convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie cinétique du vent entraîne les lames du rotor de la turbine de vent. Ceci a comme conséquence la rotation de l'axe du générateur, qui est monté sur les lames du rotor. Le générateur convertit l'énergie mécanique de l'axe de rotation en énergie électrique. Il est nécessaire d'attacher l'axe à vitesse réduite (pour les lames du rotor) à l'axe à grande vitesse du générateur avec un réducteur de transmission. Dans certains cas, les boîtes de vitesse sont indésirables parce qu'elles sont chères, encombrantes, et lourdes. Un générateur multipolaire est une manière alternative d'un système sans engrenages. Les configurations des turbines de vent et de l'interconnexion du réseau dépendent du type de générateurs qui seront décrits dans ce chapitre. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne sont très différents, en nature, des générateurs conventionnels. Par conséquent des études dynamiques doivent être adressées afin d'intégrer l'énergie éolienne dans le système d'alimentation.

### 3.2 Définition des systèmes éoliens

Une turbine de vent est une machine pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Si l'énergie mécanique est employée directement par des machines, telles qu'une pompe ou des pierres de meulage, la machine s'appelle un moulin à vent. Si l'énergie mécanique est convertie en électricité, la machine s'appelle alors un générateur de vent.

### 3.3 Classification des types d'éoliennes

Pour comprendre entièrement l'énergie éolienne, il est important de se renseigner sur les turbines de vent. Elles peuvent être classées par catégorie selon l'axe de la rotation : axe vertical ou horizontal.

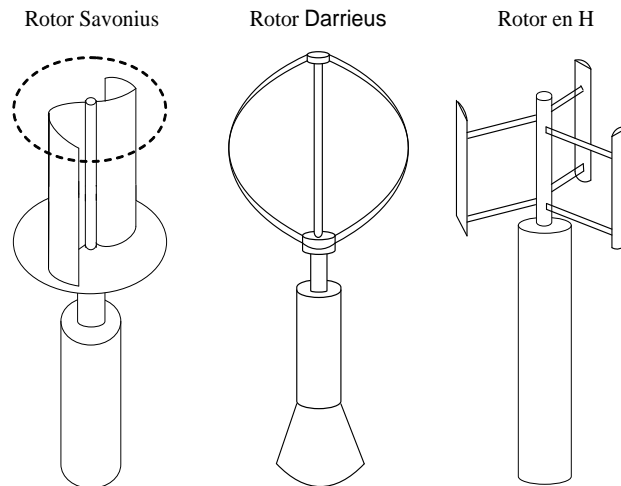
#### 3.3.1 Eoliennes à axe vertical

Les turbines du vent verticales conviennent aux applications de puissance faible. L'efficacité de puissance est limitée à 25%. Les avantages des turbines de vent verticales sont : une machinerie au sol donc pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, un fort couple de démarrage, une construction simple (Savonius voir la figure (3.1)), une faible vitesse de rotation. Mais ce type de turbine présente plusieurs inconvénients tel que le guidage mécanique, notamment le palier bas qui doit supporter le poids de l'ensemble de la turbine. Parfois (Darrieus technologie voir la figure (3.1) il y a nécessité d'entraîner au démarrage (ce serait un problème de moins aujourd'hui avec l'électronique de puissance déjà associée aux systèmes à vitesse variable).

Un autre type de rotor vertical est connu sous l'appellation du rotor en H ou le rotor de Musgrove. Les lames de Musgrove prennent une forme en 'H'. Aux vitesses du vent élevées les pales du rotor sont tournées autour d'un point horizontal dû à la force centrifuge. Ceci élimine le

risque des forces aérodynamiques plus élevées sur les lames. Le rendement aérodynamique est inférieur aux axes horizontaux et les courbes  $C_p(\lambda)$  fortement en cloche nécessitent d'optimiser la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent (système MPPT quasi indispensable).

Les turbines de l'axe vertical étaient développées et produites dans le commerce dans les années 70 jusqu'à la fin des années 80. Mais à la fin des années 80 la recherche et la production des turbines de vent de l'axe vertical s'est pratiquement arrêtée dans le monde entier.



**Figure (3.1) :** Technologies d'éoliennes à axe vertical.

### 3.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Similaires aux turbines de vent verticales, les turbines du vent horizontales peuvent être construites avec deux ou trois lames. La technologie largement dominante aujourd'hui est la turbine tripale à axe horizontal, parfois bipale et à rotor face au vent. La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière (voir la figure (3.2)): au vent (upwind) ou sous le vent (downwind).

L'avantage des dispositifs sous le vent est qu'ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances, d'éviter le système mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux. L'inconvénient majeur réside dans une fatigue accrue due aux fréquentes oscillations liées aux changements de direction du vent.

Le procédé "sous le vent ou éolienne aval" reste peu utilisé comparativement à celui "au vent ou éolienne amont".

La réduction du nombre de pales permet théoriquement de réduire le coût mais aux dépens de la régularité du couple. Le coefficient de puissance  $C_p$  est également, sensiblement plus faible, environ 5%, entre une tripale et une bipale. Des machines mono pales ont même été construites mais il semble qu'aucune ne soit actuellement commercialisée.

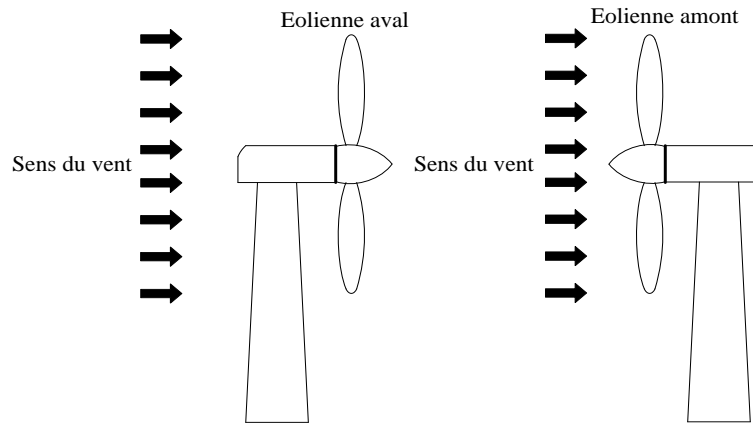


Figure (3.2): Capteurs à axe horizontal

Les éoliennes à marche lente sont équipées d'un grand nombre de pales. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît aussi rapidement par la suite. Quant aux éoliennes à marche rapide, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles sont beaucoup plus ordinaires et pratiquement toutes consacrées à la production d'énergie électrique (figure (3.3)).

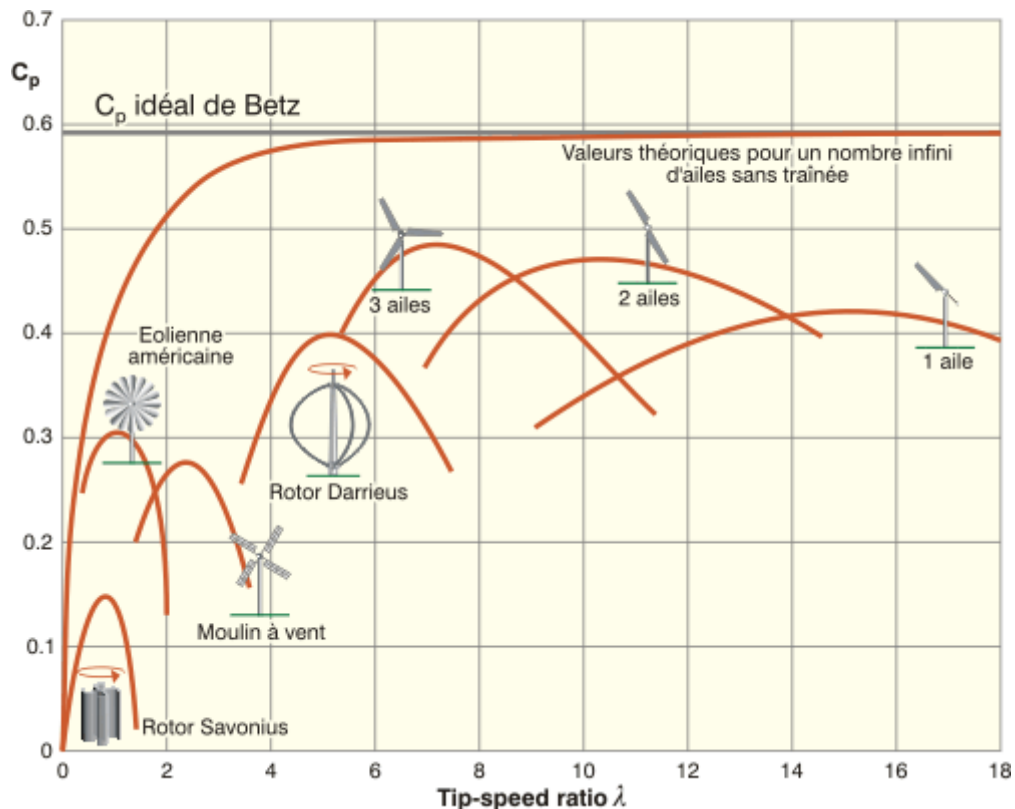


Figure (3.3): Coefficients de puissance et du couple en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour différents types de turbines.

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$ .

On peut constater ainsi que :

- ✓ Les courbes  $C_p(\lambda)$  montrent distinctement l'avantage des axes horizontaux en termes de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...).
- ✓ Les courbes  $C_p(\lambda)$  sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (3, 2,1) par rapport aux axes verticaux ou aux multi-pales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de  $\lambda$  autour de  $\lambda_{opt}$  (fonction MPPT moins importante).

Sur la (figure 3.3), on remarque dans un premier temps que les aéromoteurs à axe horizontal et vertical de type Darrieus ont un meilleur rendement aérodynamique.

Les aéromoteurs "américains" ont un nombre de pales important car ils évoluent à de faibles vitesses de rotation. Ils produisent un couple aérodynamique important afin de produire de l'énergie mécanique (application de pompage). Enfin, on peut observer l'influence du nombre de pales sur le rendement aérodynamique.

### 3.3.3 Les principaux composants d'un système éolien

Comme indiqué antérieurement, il existe deux types de systèmes éoliens: les systèmes à axe vertical et ceux à axe horizontal, mais dans cette thèse on ne s'intéressera qu'aux systèmes à axe horizontal.

Une turbine de vent se compose de plusieurs pièces pour réaliser la conversion d'énergie cinétique-à-électrique. Les composants principaux d'une turbine de vent moderne d'axe horizontal sont présentés sur la (figure 3.4). L'anémomètre (ou système de mesure du vent) mesure la vitesse du vent et transfère les données au contrôleur (Panneau du contrôle). L'angle du lancement des lames de rotor (ou pales) est commandé par le contrôleur pour atteindre l'énergie éolienne maximale et pour limiter la transmission mécanique en cas de vent violent. Les lames du rotor sont lancées pour diminuer l'angle d'attaque du vent quand la puissance estimée est atteinte.

La technologie des turbines de vent modernes s'est développée rapidement pendant les deux dernières décennies. Le principe de base d'une turbine de vent est resté presque inchangé et se compose de deux processus de conversion effectués par les composants principaux: le rotor et le générateur. Suivant les indications de la figure (3.4), l'énergie cinétique du vent entraîne les lames du rotor de la turbine de vent. Le rotor qui extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme en couple de générateur.

Ceci a comme conséquence la rotation de l'axe du générateur, qui est monté sur les lames du rotor. Le générateur transforme l'énergie mécanique de l'axe de rotation en énergie électrique. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor du générateur à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur (ou boîtes de vitesse). Dans certains cas, les boîtes de vitesse sont indésirables par ce qu'elles sont coûteuses, encombrantes, et lourdes. Un générateur multipolaire est une manière alternative d'un système sans engrenages.

La salle de machine (ou la nacelle) est accessible de la tour (ou le mat) et contient tous les composants principaux tels que l'axe principal avec le roulement, la boîte de vitesse, le générateur, les freins et le système de rotation. L'axe principal transfère le couple du rotor à la boîte de vitesse.

Des turbines de vent sont équipées par un système de sûreté robuste comprenant un circuit de freinage aérodynamique.

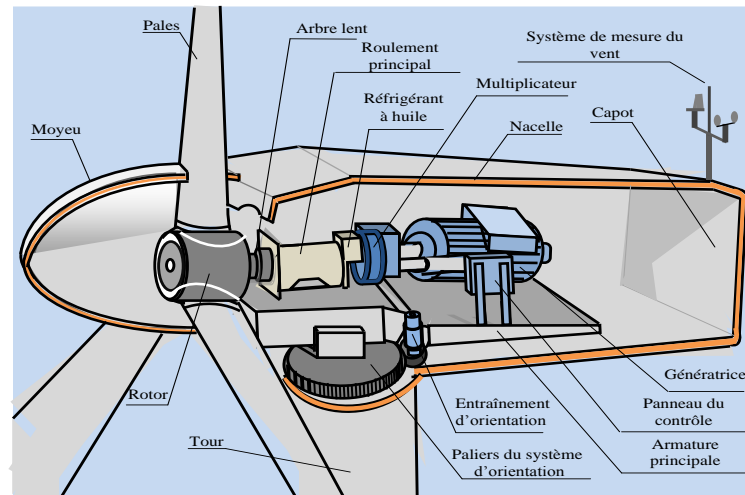


Figure (3.4) : Schéma coupé d'une turbine de vent d'axe horizontal.

#### a. Pale de turbine

La pale est le composant le plus distinctif et le plus évident d'une turbine de vent. Elle est également responsable d'effectuer une des tâches les plus essentielles du processus de conversion d'énergie éolienne à savoir la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation.

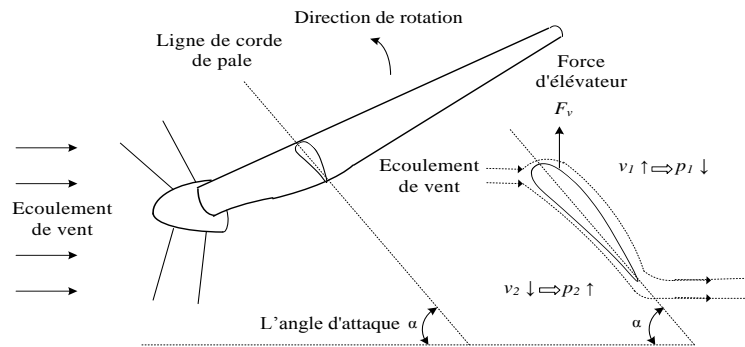
Les lames ont considérablement évolué en conception et matériaux aérodynamiques, des premières lames de moulin à vent faites en bois et tissu. Les lames modernes sont généralement faites en aluminium, fibre de verre, ou composés de fibre-carbone qui fournissent le rapport force-poids, la résistance à la fatigue, et la rigidité, nécessaires, tout en réduisant au minimum le poids. Le rotor tripale est considéré comme le standard industriel pour les grandes turbines du vent.

Les turbines mono-pales et bipales sont employées pour des vitesses de rotation plus élevées et par conséquent pour les faibles couples. C'est un avantage du point de vue de la réduction de rapport de vitesse par rapport aux turbines tripales, donc une diminution du coût et de la taille de la boîte de vitesse. Cependant, on constate une augmentation du bruit acoustique qui varie proportionnellement à la vitesse d'extrémité de pale.

Les rotors avec plus de trois pales ne sont pas communs puisqu'ils sont plus chers (plus de pales). La turbulence du vent de ralentissement d'une pale peut affecter les autres pales puisque l'espace entre elles est faible. Par conséquent, le rotor tripale présente la meilleure différence entre l'effort mécanique, le bruit acoustique, le coût, et la vitesse de rotation pour de grandes turbines de vent.

Le principe de fonctionnement aérodynamique de la pale de turbine est semblable aux ailes d'un avion. Il peut être expliqué par le principe de Bernoulli, qui déclare que pendant la vitesse des augmentations mobiles d'un fluide (liquide ou gaz), la pression dans le fluide diminue.

La forme incurvée de la pale crée une différence entre la vitesse du vent au-dessus ( $v_1$ ) et au-dessous ( $v_2$ ) de la pale, comme illustré par la figure (3.5). Le flux d'air au-dessus de la pale est plus rapide qu'au-dessous ( $v_1 > v_2$ ), selon le principe de Bernoulli, le phénomène est inverse sur la pression ( $p_2 > p_1$ ). La différence de pression entre le dessus et le bas de la pale a comme conséquence une force d'élevateur nette  $F_v$  sur la pale. La force appliquée dans une certaine distance d'un pivot (l'axe de turbine) produit le couple, qui crée le mouvement de rotation de la turbine de vent.



**Figure (3.5):** Aérodynamique et l'angle d'attaque de pale de turbine de vent.

Un des paramètres importants pour commander la force d'élevateur de la pale est l'angle d'attaque  $\alpha$ , qui est défini comme l'angle entre la direction de vitesse du vent  $v$  et la ligne de corde de la pale suivant les indications de la (figure 3.5). A une pale donnée, la force d'élevateur  $F_v$  peut être ajustée par l'angle d'attaque  $\alpha$ . Quand cet angle est égal à zéro, aucune force d'élevateur ou couple ne sera produite, ce qui se produit souvent quand la turbine du vent est arrêtée pour l'entretien ou la réparation.

La puissance d'un débit de masse d'air à vitesse de vent  $v$  par une surface  $S$  peut être calculée par:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (3.1)$$

$\rho$  représente la densité volumique de l'air en  $\text{kg/m}^3$ . La densité d'air  $\rho$  est fonction de la pression atmosphérique et de la température de l'air (par exemple  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$  pour la température de  $15^\circ\text{C}$  et une pression de 1013 mbar),  $S$  est la surface balayée par le rotor ( $\text{m}^2$ ),  $v$  est la vitesse du vent (m/sec).

L'énergie éolienne capturée par la pale et convertie en transmission mécanique peut être calculée par:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p \quad (3.2)$$

Où  $C_p$  est le coefficient de puissance de la pale. Ce coefficient a une valeur théorique maximale de 0.59 selon la limite de Betz. Avec la technologie d'aujourd'hui, le coefficient de puissance



d'une turbine moderne s'étend habituellement de 0.2 à 0.5, il est fonction de la vitesse de rotation et du nombre de pales.

On peut distinguer à partir de l'équation (3.2) qu'il y a trois possibilités pour augmenter la puissance  $P_m$  capturée par une turbine de vent: la vitesse du vent  $v$ , le coefficient de puissance  $C_p$ , et la surface balayée par le rotor  $S$ .

Puisque la vitesse du vent ne peut pas être commandée, la seule manière d'augmenter la vitesse du vent est de localiser les turbines dans les régions avec des vitesses du vent moyennes plus élevées. Citons comme exemple la ferme du vent en mer, où la vitesse du vent est habituellement plus haute et plus régulière que sur la terre. La puissance capturée est une fonction cubique de la vitesse du vent. Le doublement de la vitesse moyenne du vent augmenterait l'énergie éolienne par huit.

En second lieu, la turbine du vent peut être conçue avec une plus grande surface balayée par le rotor de l'éolienne (c'est-à-dire, un rayon plus grand) pour capturer plus de puissance. La surface balayée par le rotor est calculée par  $S=\pi.R^2$ , où  $R$  est le rayon de pale. Une augmentation de rayon de pale a un effet quadratique sur la surface  $S$  et la puissance capturée. Ce qui explique la tendance, ces dernières années, d'augmenter le diamètre du rotor. Enfin, la troisième manière d'augmenter la puissance capturée est d'améliorer le coefficient de puissance de la pale par une meilleure conception aérodynamique.

La fabrication de lames est un processus pénible et exige une planification soignée et un grand espace d'usine. C'est une combinaison de processus automatisés et manuels. Considérant que le rayon de pale d'une turbine de vent de puissance de 10 MW est similaire à un Boeing 747, suivant les indications de la figure (3.6), on peut apprécier les issues de fabrication de complexité et de potentiel. Le transport et l'installation de lames sont d'autres grands défis.

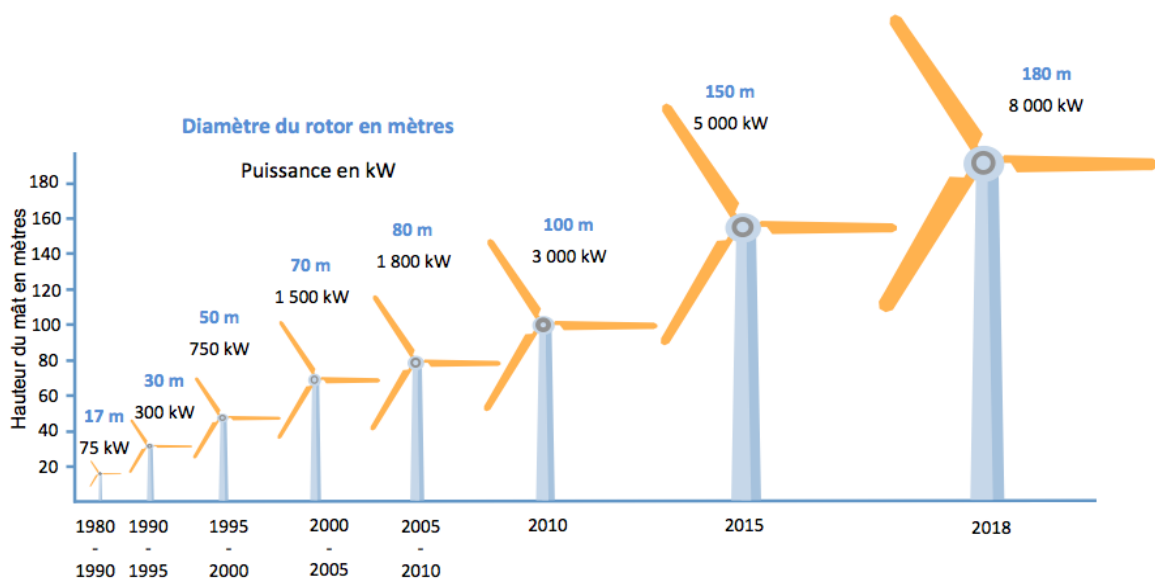


Figure (3.6) : Évolution de la taille de turbine.

### b. Générateur

La conversion de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique est exécutée par le générateur. Différents types de générateur ont été employés dans des systèmes énergétiques éolienne au cours des ces années. Ceux-ci incluent le générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG: Squirrel Cage induction Generator), le générateur à induction double alimenté (DFIG: Doubly Fed Induction Generator), et le générateur synchrone (SG: Synchronous Generator) (à rotor bobiné et à aimant permanent) avec des estimations de puissance de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Les principes du fonctionnement, les caractéristiques, et les modèles mathématiques de ces générateurs seront présentés dans les chapitres suivants.

## 3.4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

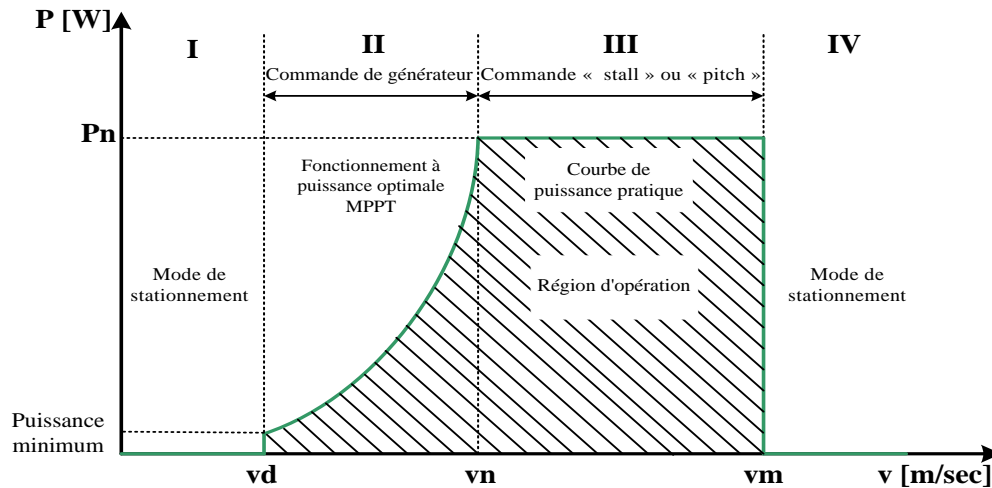
Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne en cas de vents violents et de délimiter la puissance. Cette source éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nécessaire, dénommée puissance nominale  $P_n$ . Cette puissance  $P_n$  est obtenue à partir de la vitesse  $v_n$  (vitesse nominale) du vent relatif. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $v_n$  la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A coté de la vitesse nominale  $v_n$ , on spécifie aussi:

- la vitesse de démarrage,  $v_d$ , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent,  $v_m$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées (voir la figure (3.7)):

- la zone I, où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas).
  - la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$ . Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent, est appliqué. Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, en général l'angle de calage est fixé par  $\beta=0^\circ$ . Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.
  - la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ .
  - la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.
- La plupart des grandes turbines éoliennes utilise deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice:



**Figure (3.7) :** Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Il existe deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la turbine, à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- Le système "**pitch**" ou "**à pas variable**" qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesse.
- Le système "**stall**" ou à "**décrochage aérodynamique**", le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite: il s'agit donc d'une solution passive.

### 3.4.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau.

Le contrôle à décrochage de charge est un système de contrôle passif qui réagit au-delà d'une certaine vitesse du vent. Les pales du rotor sont fixées et ne peuvent pas tourner autour de leur axe longitudinal. L'angle de calage est choisi afin de permettre le décrochage du flux d'air de la surface de la pale pour des vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. Cela réduit la portance et augmente la force de traînage.

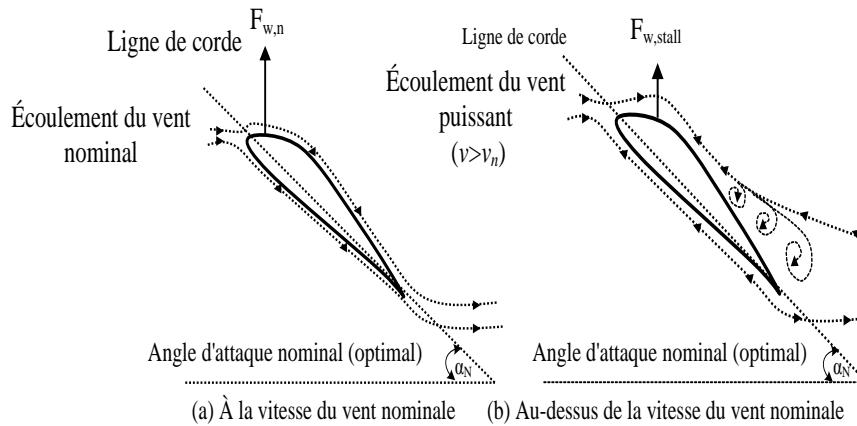
En comparaison avec les turbines à angle de calage variable, celles à décrochage ont les avantages suivants :

- ✓ Pas de système de contrôle d'angle de calage
- ✓ Construction plus simple et moins coûteuse du rotor
- ✓ Maintenance plus aisée ou meilleure fiabilité (nombre plus réduit de pièces mécaniques en mouvement).

On distingue deux stratégies de contrôle de type stall "Passive-stall control ou contrôle décrochage aérodynamique passif" et "Active-stall control ou contrôle décrochage aérodynamique actif".

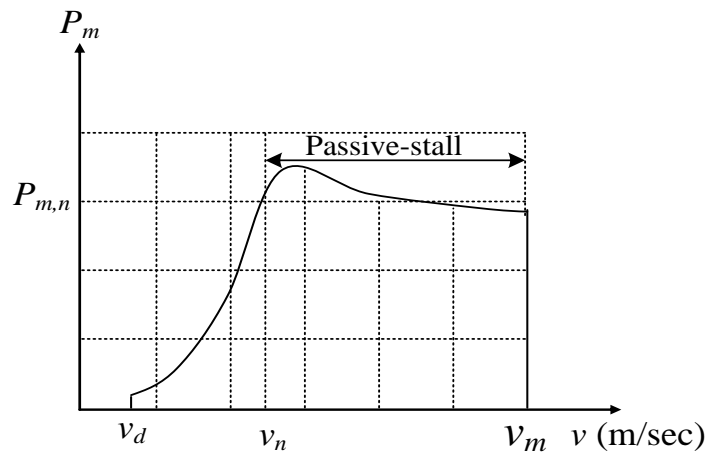
Pour le contrôle passif (passive-stall), la lame est fixée sur le hub de rotor à un angle d'attaque (nominal) optimal. Quand la vitesse du vent est au-dessous de la valeur nominale, les lames de turbine avec l'angle d'attaque optimal peuvent capturer la puissance maximale selon la vitesse du

vent disponible. Si la vitesse du vent dépasse la valeur nominale, le vent violent peut entraîner des turbulences à la surface de la lame. Le principe de fonctionnement du contrôle passif est illustré par la figure (3.8), où la force d'élévateur produite par la vitesse du vent nominale  $F_{w,n}$  est plus petite devant celle produite par la vitesse du vent violent  $F_{w, stall}$ . Ceci va garantir le ralentissement de la turbine pour des vitesses du vent supérieure à la vitesse nominale du vent  $v_n$ .



**Figure (3.8):** Principe de la commande passive-stall.

Suivant les indications de la figure (3.9), on constate que la passive-stall ne peut pas garder la puissance capturée  $P_m$  à une valeur constante. Elle peut dépasser la puissance nominale à quelques vitesses du vent, ce qui n'est pas un dispositif souhaitable.

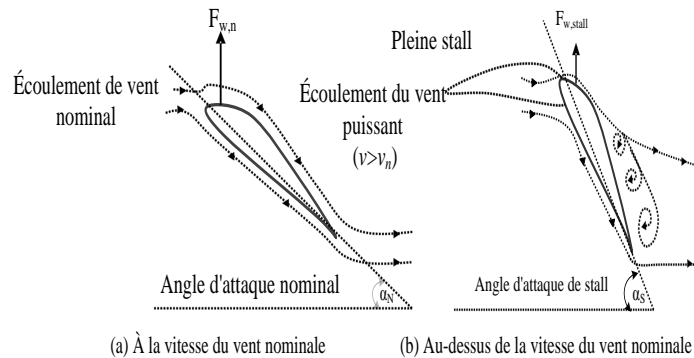


**Figure (3.9):** Turbine de vent commandée par passive-stall.

Si la turbine est lancée légèrement aux vitesses du vent élevées, pour ajuster la perte de vitesse, ceci s'appelle le contrôle à "décrochage actif" ("Stall actif"). Dans ce cas, les pales du rotor sont orientées dans la direction du décrochage (angle négatif) et non dans la direction contraire (angle positif), comme pour les éoliennes à angles de calage variable.

Un exemple qualitatif pour montrer le principe de commande passive-stall est illustré par la figure (3.10). Dans le cas d'un vent violent, la lame perd toute l'interaction avec le vent et

provoque l'arrêt total du rotor de la turbine. Cette opération peut être employée au-dessus de la vitesse du vent nominale pour protéger la turbine contre les dommages.



**Figure (3.10):** Principe du contrôle Stall actif.

### 3.4.2 Système à pas variable "Pitch"

Normalement, pour l'orientation des pales est fonction de la vitesse du vent, il faudrait également prendre en compte les variations des caractéristiques de l'air et l'état de surface des pales (givre éventuel, salissures...) qui influent sur le comportement aérodynamique. Les pales sont face au vent aux basses vitesses (de la vitesse minimale à la vitesse de base) puis s'inclinent pour atteindre la position "drapeau" à la vitesse maximale.

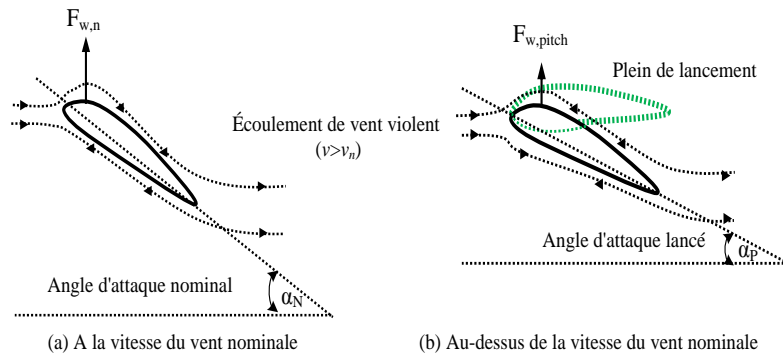
Mécaniquement, il s'agit d'un dispositif sophistiqué (commande par vérins hydrauliques dans les grosses machines), surtout pour les petites machines où il grèverait le coût, et pour les très grosses puissances (au delà du MW) où il devient fragile.

Ce système de régulation offre les avantages suivants :

- ✓ La possibilité de pouvoir effectuer un contrôle actif de la puissance sous toutes les conditions du vent (en dehors de la vitesse limite de sécurité), y compris à une puissance partielle.
- ✓ Il peut fournir la puissance nominale même quand la densité de l'air est faible (des sites sur les hauteurs, grandes températures).
- ✓ Une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage stall dans les mêmes conditions de fonctionnement.
- ✓ Démarrage rapide par changement de l'angle de calage.
- ✓ Il n'y a pas besoin de freins puissants pour les arrêts d'urgence.
- ✓ Les contraintes des pales sont plus faibles quand les puissances sont supérieures à la valeur nominale.
- ✓ La masse réduite des pales du rotor mène à une masse réduite de la turbine éolienne.

Le principe du fonctionnement de la commande de lancement est illustré par la figure (3.11). Quand le vent est en dessous de la vitesse évaluée (nominale), l'angle d'attaque de pale est maintenu à sa valeur évaluée (optimale)  $\alpha_P$ . Dans le cas où la vitesse du vent est plus élevée que la vitesse du vent évaluée, l'angle d'attaque de la lame sera diminué pour réduire la force d'élévateur  $F_{w,pitch}$ . Quand la lame est entièrement lancée, l'angle de l'attaque de pale est aligné

avec le vent, comme représenté par la figure (3.11b), et aucune force d'élévateur ne sera produite. La turbine cessera de tourner puis sera fermée par le frein mécanique pour protéger la turbine et l'aérogénérateur. L'exécution de la commande de lancement est représentée par la figure (3.11b), où la transmission mécanique de l'opération de turbine au-dessus de la vitesse du vent évaluée peut être bien contrôlée.



**Figure( 3.11):** Principe aérodynamique de la commande de l'angle lancement.

La commande de lancement réagit plus rapidement que la commande stall et fournit une meilleure contrôlabilité. Elle est largement adoptée actuellement dans de grands systèmes d'énergie éolienne.

En général, la modification de l'angle de lancement de la pale de l'éolienne a quatre objectifs distincts :

- ✓ Démarrage à une vitesse du vent,  $v_d$ , réduite.
- ✓ Régulation de la vitesse  $\Omega$ , pour  $v > v_n$ .
- ✓ Optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites  $[v_d, v_n]$ .
- ✓ Protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ( $v > v_m$ ), par la mise en "drapeau" des pales de l'hélice.

### 3.5 Choix d'aérogénérateurs et leurs raccordements avec le réseau

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants:

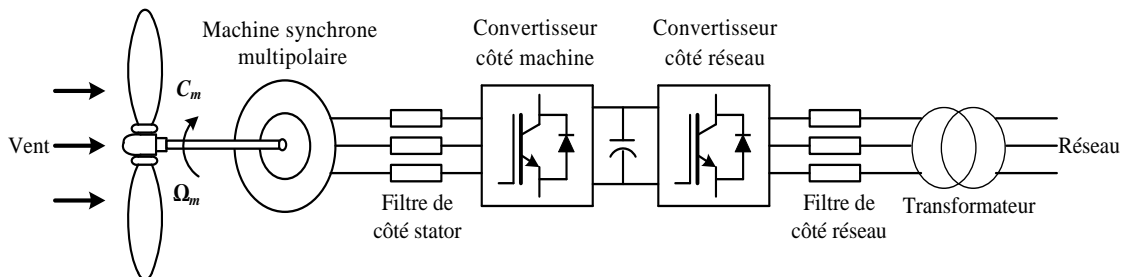
- Fonctionnement à vitesse fixe :
  - Système électrique plus simple.
  - Plus grande fiabilité.
  - Faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
  - Pas besoin de système d'électronique de puissance.
  - Moins cher.
- Fonctionnement à vitesse variable :

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

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donnera par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine:

### 3.5. 1 Générateurs synchrones

Elles sont particulièrement utilisées dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), où on utilise des **machines synchrones**. Leurs performances, notamment en terme de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.



**Figure (3.12):** Chaîne de conversion à génératrice synchrone à rotor bobiné et convertisseur de fréquence.

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses, le principal fabricant est Enercon (environ 3000 machines sont déjà en service). L'inducteur (rotor) est bobiné, il nécessite un système bagues lisses-balais pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI.

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (Jeumont Industrie) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années.

La turbine du vent à vitesse variable basée sur un générateur synchrone est représentée schématiquement par la figure (3.12). Les axes aérodynamiques du rotor et du générateur peuvent être couplés directement (c'est-à-dire sans boîte de vitesse). Dans ce cas, le générateur est un générateur synchrone multipolaire conçu pour des basses vitesses, ou elles peuvent être couplées par une boîte de vitesse, qui tient compte d'un générateur avec un nombre plus élevé des pôles. Le générateur peut être une machine synchrone électriquement excitée ou une machine à un aimant permanent. Pour permettre l'opération à vitesse variable, le générateur synchrone est relié au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance pour assurer la variation de fréquence, ce qui découple complètement la vitesse du générateur et la

fréquence du réseau. Par conséquent, la fréquence électrique du générateur peut varier pendant le changement de la vitesse du vent, tandis que la fréquence du réseau reste sans changement.

Le système de convertisseur de puissance comprend les deux convertisseurs de côté réseau et de côté générateur, reliés dos à dos par un lien continu. Le convertisseur de côté réseau est commandé par la technique de largeur d'impulsion (MLI), et le convertisseur de côté générateur peut être considéré comme un redresseur à MLI.

Le plus grand inconvénient de cette technique est la taille du convertisseur bidirectionnel qui doit être de même niveau que la puissance de l'alternateur. En outre, on doit éliminer la déformation provoquée par les harmoniques produites à cause du convertisseur bidirectionnel en utilisant un système de filtrage. Un autre inconvénient est que la machine multipolaire exige un nombre élevé de pôles, par conséquent l'augmentation de la taille de la machine multipolaire par rapport aux générateurs avec l'accouplement de boîte de vitesse.

### 3.5.2 Générateur asynchrone à cage d'écureuil

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". La première machine qui vient à l'esprit pour ces systèmes est la génératrice synchrone. Cependant le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage d'écureuil jusqu'à des puissances allant au-delà du megawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive et à un démarreur automatique progressif à gradateur, permettant de limiter le transitoire d'appel au moment de la connexion au réseau figure (3.13)).

La turbine de vent à vitesse fixe avec un générateur asynchrone à cage d'écureuil est directement reliée au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur. Puisque le générateur à induction à cage d'écureuil exige la production de la puissance réactive par le réseau, il va créer des conditions inacceptables comme le facteur de chute de tension ou de puissance faible.

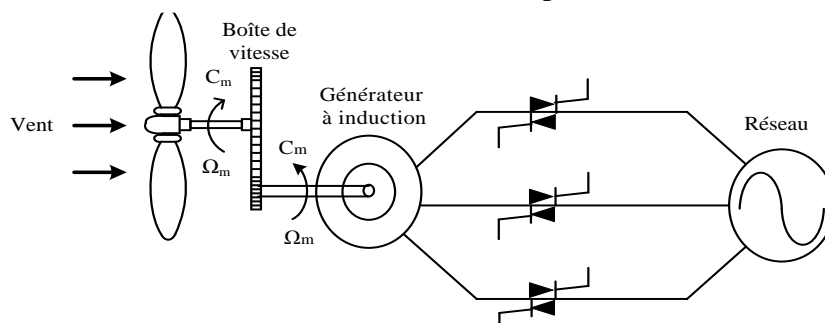
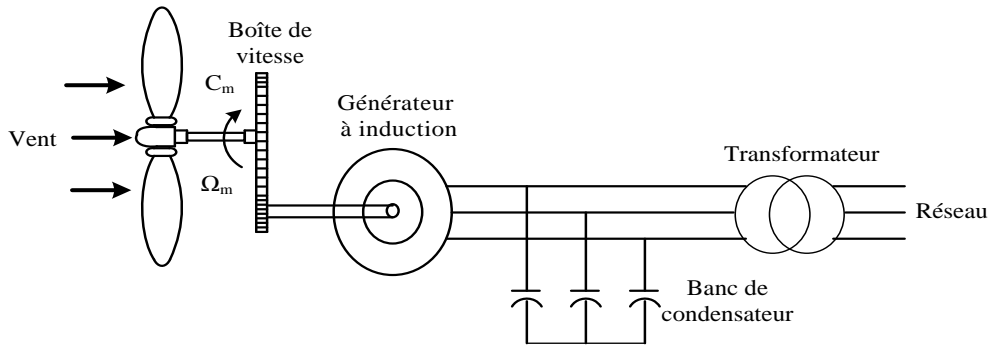


Figure (3.13): Démarreur souple

La puissance réactive compensée peut être assurée à partir d'un banc de condensateur ou d'un convertisseur de puissance. Pour les générateurs à induction à vitesse fixe ou de liaison directe, les bancs de condensateur peuvent assurer la puissance réactive, améliorant de ce fait le facteur de puissance. La topologie de ce type est illustrée par la figure (3.14). Pour la liaison directe, le



générateur à induction doit fonctionner à la fréquence synchrone du réseau. Ainsi, il doit y a une boîte de vitesse pour augmenter la vitesse réduite de l'axe des lames de rotor à la vitesse du réseau.



**Figure (3.14):** générateur à induction à cage d'écureuil avec la liaison directe au réseau.

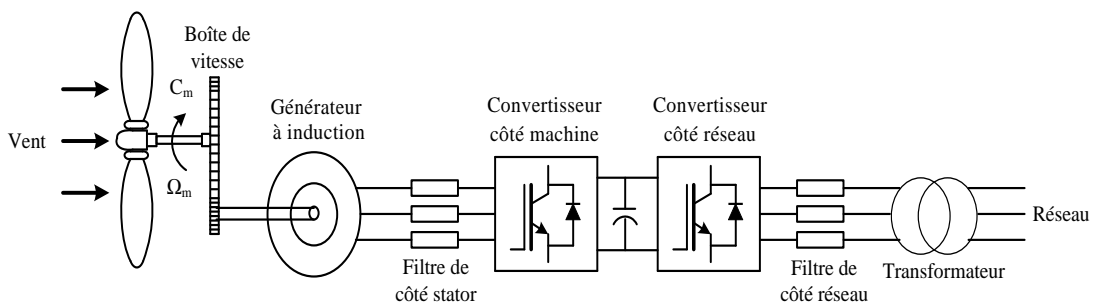
Cette topologie présente les avantages suivants :

- Le générateur à induction à cage d'écureuil (GICE) est directement relié au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur.
- Le GICE exige un entretien minimal.

Cependant les inconvénients de ce type sont listés comme suit :

- Le GICE exige un ralentisseur.
- Le GICE tire la puissance réactive du réseau qui est compensée par des bancs de condensateur (en l'absence de banc de condensateur de tension, des fluctuations et des pertes de ligne électrique inévitables). Donc cette topologie nécessite une excitation de puissance réactive.
- Opération à vitesse fixe.

Pour le générateur à induction à cage à vitesse variable, le convertisseur de puissance doit fournir la puissance réactive aux générateurs. La topologie est présentée par la figure (3.15).



**Figure (3.15) :** Générateur à induction à cage d'écureuil avec des convertisseurs de puissance.

L'enroulement du stator est relié au réseau par des convertisseurs de puissance CA/CC/CA. Le système de contrôle du convertisseur de côté du stator commande le couple électromagnétique et assure la puissance réactive pour maintenir la magnétisation de la machine. Le convertisseur de côté réseau contrôle la puissance active et réactive ainsi que le niveau de la tension de lien continu.

Les utilisations du générateur à induction à cage d'écureuil par cette topologie ont quelques avantages :

- Le redresseur peut produire de l'excitation programmable pour le générateur.
- La réponse transitoire est rapide.
- L'inverseur peut fonctionner comme compensateur d'énergie réactive (réduction des harmoniques) quand la capacité est disponible.

Les inconvénients de ce type sont :

- Une commande de système complexe (FOC) dont l'exécution dépend de la bonne connaissance du paramètre de générateur avec lequel varient la température et la fréquence.
- le convertisseur de côté de stator doit être surdimensionné de 30-50% de la puissance nominale, afin de fournir la condition magnétisante de la machine.

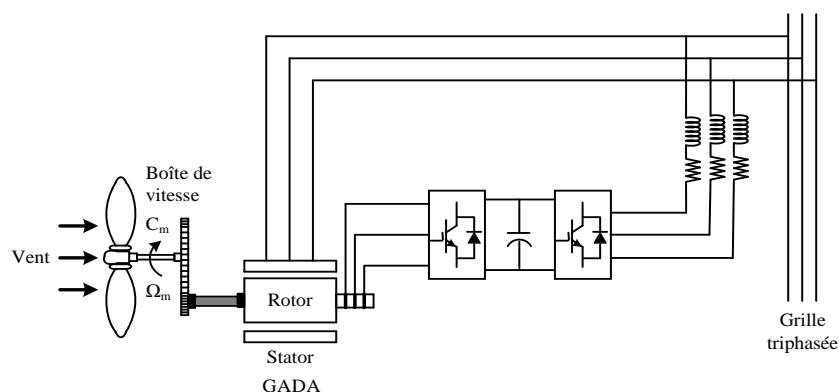
On peut éviter les effets du premier inconvénient en employant la commande directe du couple DTC (Direct Torque Control), où cette stratégie minimise au maximum l'utilisation des paramètres de la machine à cage.

### 3.5.3 Générateur asynchrone à rotor bobiné

Le générateur asynchrone double alimenté GADA (DFIG: Doubly Fed Induction Generator) a été utilisé pendant des années, pour les entraînements à vitesse variable. Dans ce cas, le stator est relié directement au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur bidirectionnel qui est également relié au réseau, comme indiqué sur la figure (3.16).

Par l'utilisation de la technique de commande vectorielle, le convertisseur bidirectionnel assure la génération d'énergie à la fréquence nominale et la tension nominale du réseau, indépendamment de la vitesse de rotor.

Le but principal du convertisseur est de compenser la différence entre la vitesse du rotor et la vitesse synchrone avec la commande glissante.



**Figure (3.16) :** Générateur à induction double alimenté GADA (à rotor bobiné).

Le système, composé d'un générateur à double alimentation, contrôlé par le rotor à vitesse variable, semble un bon compromis par rapport à ces critères. Un de ses avantages déterminant vient du fait que c'est le seul schéma dans lequel la puissance générée peut être supérieure à la

puissance nominale de la machine utilisée. La fréquence de rotation peut varier d'une valeur inférieure à la fréquence du réseau (si l'éolienne est raccordée), on parle alors de fonctionnement hyposynchrone. Elle peut aussi dépasser largement la fréquence du réseau (jusqu'à deux fois la fréquence du réseau:  $g=-1$ ), ce qui correspond à un régime "hypersynchrone".

L'électronique de puissance qui permet de régler les transferts d'énergie à partir du rotor est dimensionnée pour une puissance très nettement inférieure à celle du stator (environ 20%). Le coût du système à vitesse variable se trouve donc clairement amoindri.

Les caractéristiques principales peuvent être récapitulées comme suit :

- Gamme de vitesse de fonctionnement limitée (- 30% à +20%).
- Convertisseur d'électronique de puissance à échelle réduite. Pertes de puissance réduites, contrôle complet des prix...
- puissance active et puissance réactive échangées avec le réseau.
- Besoin de bagues coulissantes.
- Besoin de vitesse (vitesse normalement à deux étages).

### 3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis une vue d'ensemble des systèmes de conversion d'énergie éolienne. Les concepts de base, les faits, l'état actuel, et les tendances du marché de la technologie d'énergie éolienne ont été présentés. Les principes fondamentaux des systèmes énergétiques éoliennes ont été discutés, y compris autonome et les opérations reliées à un réseau, des turbines d'axe horizontal et d'axe vertical, des opérations à vitesse fixe et à vitesse variable, leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique), les types d'aérogénérateurs utilisés dans les systèmes de conversion éolien et leurs branchements avec le réseau. Une comparaison a été faite entre les deux systèmes existants typiques de turbine de vent après une brève introduction de chaque système.

# **C H A P I T R E 4**

**Autres sources renouvelables :  
hydraulique, géothermique,  
biomasse**

## 4.1 Introduction

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) paraissaient être inépuisables. Les différentes crises pétrolières ont mis en évidence l'utilité des énergies renouvelables en substitution aux produits pétroliers. L'une d'elle, la biomasse est souvent décrite comme étant « l'ensemble de toutes les matières premières renouvelables d'origine végétale ou animale destinées à des utilisations non alimentaires ». La biomasse est un combustible varié. Au sens large, elle comprend « l'ensemble des êtres vivants, animaux ou végétaux, ainsi que leurs productions, sous-produits ou déchets (déjections, etc.) ». La biomasse forme les différents écosystèmes de la planète et participe à leurs équilibres naturels. Elle a d'abord été cultivée et élevée par l'homme pour son alimentation, mais elle fournit également des matériaux de construction et est utilisée comme matière première pour certains procédés industriels et pour la production d'énergie, on parle alors de bioénergie.

## 4.2 Les biomasses comme source de chaleur

Actuellement, les biomasses les plus utilisées à des fins énergétiques sont :

- ✚ Les résidus issus des systèmes de productions :
  - ✓ Agricoles telles que les fumiers, lisiers, fientes, pailles, balles de riz, etc.
  - ✓ Forestières telles que les rémanents forestiers (parties des arbres ou taillis non exploitable en scierie).
- ✚ Les résidus de la transformation des productions agricoles et forestières : chutes de scieries, coproduits des industries agroalimentaires, etc.

Dans ces deux cas (Tableau 4.1), la biomasse provient de coproduits générés par un produit qui n'est pas destiné à la production d'énergie. Par exemple, les porcs (le produit) sont élevés pour la production de viande mais les lisiers (le coproduit) sont valorisés dans la production d'énergie.

Certaines cultures sont uniquement dédiées à des fins énergétiques, comme le colza pour les biocarburants. Dans ce cas, il ne s'agit plus de la valorisation d'un produit connexe mais de cultures énergétiques. On parle alors d'agrocarburants.

Les impacts en termes de développement durable de ces cultures sont au centre d'un débat de société. Les cultures à des fins de production d'agrocarburants peuvent occuper des surfaces au détriment de l'agriculture vivrière ou au détriment de surfaces de forêts ou de marécages.

Les déchets de l'activité humaine sont de plus en plus utilisés pour la production d'énergie : boues de stations d'épuration, fraction organique des déchets ménagers, tontes de pelouse, etc.

Ce type de biomasse est particulièrement abondant dans les villes et grands centres urbains. Leur valorisation énergétique est une opportunité de plus en plus envisagée par les gestionnaires de déchets.

**Tableau 4.1** : Principales biomasses utilisées pour la production d'énergie.

	<b>Productions agricoles</b>	<b>Productions forestières</b>
<b>Résidus des activités de production</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pailles de céréales, anas de lin, balles de riz, rafles de maïs, grains déclassés, etc.</li> <li>▪ Effluents d'élevage : lisiers, fumiers, purins, fientes, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rémanents forestiers : houppiers, souches, etc.</li> </ul>
<b>Résidus des industries de transformation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Effluents d'industries agroalimentaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coproduits de scieries, de menuiseries, etc. (dosses, sciures, copeaux, chutes diverses, etc.)</li> </ul>
<b>Cultures dédiées (« cultures énergétiques »)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agrocarburants : betteraves, colza, canne à sucre, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Taillis à très courte rotation (TTCR) de saules, de peupliers, etc.</li> <li>▪ Taillis pour bois de chauffe, miscanthus</li> </ul>
<b>Autres biomasses (résidus d'activités humaines)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fraction organique des déchets ménagers</li> <li>▪ Boues de stations d'épuration</li> <li>▪ Tontes de pelouses</li> <li>▪ Huiles de friture</li> <li>▪ Bois de démolitions ou de « parcs à conteneurs »</li> </ul>	

La production d'énergie à partir de la biomasse pourrait paraître marginale. Elle est pourtant très importante, principalement pour la production de chaleur (feux ouverts et poêles à bois, chaufferies industrielles).



**Figure (4.1) :** Empilement de bûches : produits connexes de l'exploitation forestière.



**Figure (4.2) :** Empilement de dosses : l'industrie de transformation du bois.

## **4.3 Un combustible renouvelable**

### **4.3.1 Une exploitation durable**

Une énergie renouvelable est une énergie générée à partir d'une source qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable. Les combustibles fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon, etc.) se sont formés pendant plusieurs millions d'années. L'utilisation de ces combustibles, beaucoup plus rapide que leur formation, appauvrissent les réserves naturelles mondiales de manière irréversible pour quelques générations. Les combustibles fossiles ne sont donc pas des sources renouvelables d'énergie. La biomasse, cultivée ou élevée par l'homme, est censée se renouveler après chaque utilisation. La biomasse

est donc une source renouvelable d'énergie pour autant que les systèmes d'exploitations agricoles et forestiers soient durables et responsables.

C'est le cas en Europe, où pour chaque arbre coupé, un arbre est planté. Cependant, dans certains cas, comme celui de la zone sahélienne où les coupes de bois ne sont pas compensées par des plantations, la biomasse ne peut être considérée comme une source renouvelable et durable d'énergie.

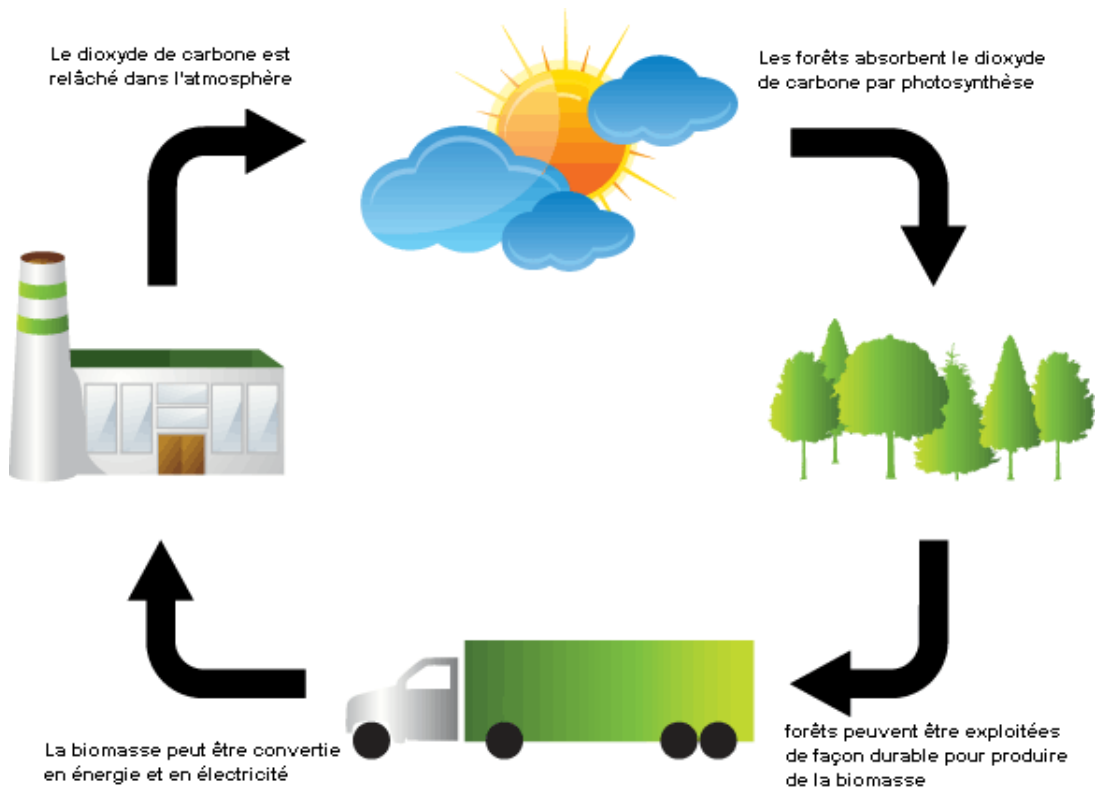


**Figure (4.3) :** La biomasse.

#### **4.3.2 Un cycle de CO<sub>2</sub> neutre ou ferme**

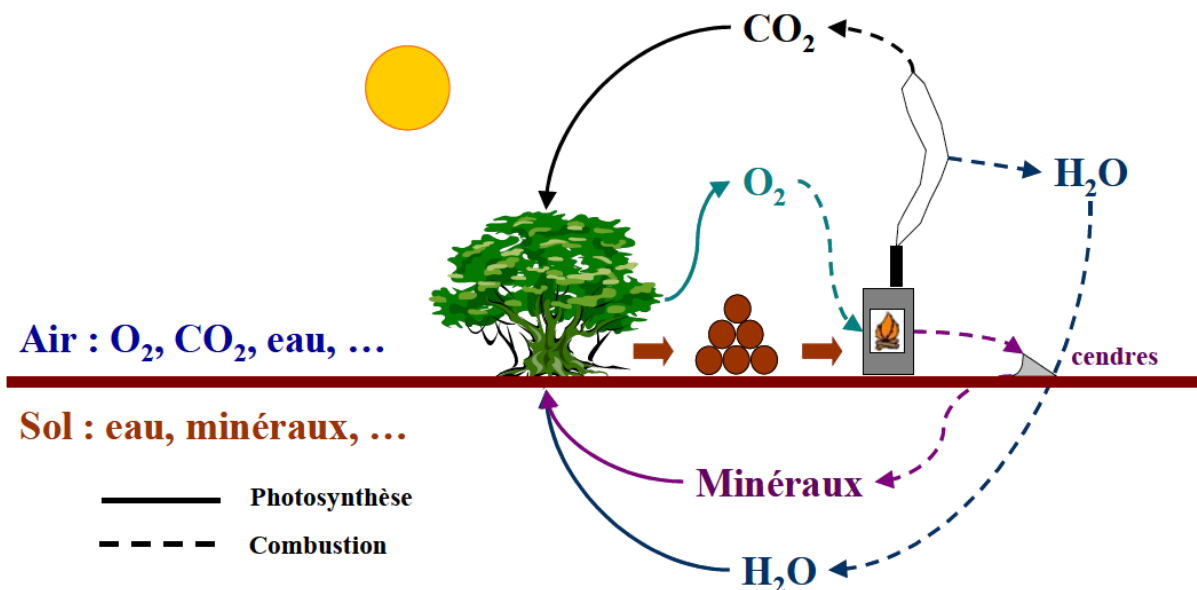
Lors de sa combustion, la biomasse libère du CO<sub>2</sub>, un gaz à effet de serre. Mais le CO<sub>2</sub> libéré est celui que les plantes et végétaux ont capté dans l'atmosphère durant leur croissance. Il n'y a donc pas d'émission de CO<sub>2</sub> nouveau : la valorisation énergétique de la biomasse est neutre au niveau du CO<sub>2</sub>. On dit que le cycle du carbone est neutre ou fermé (figure (4.4)), la biomasse énergie ne participe pas au réchauffement climatique pour autant que les systèmes d'exploitations agricoles et forestiers soient durables et responsables. Les combustibles fossiles quant à eux augmentent la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère lors de chaque utilisation. Dans ce cas, on dit que le cycle du carbone est ouvert.





**Figure (4.4) :** Cycle du carbone.

Lors de la photosynthèse, les végétaux captent le  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et l'utilisent, grâce à l'énergie du soleil, pour construire tous leurs composants (tiges, racines, feuilles, etc.). Lors de ce processus, de l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. Lors de la combustion de la biomasse, de l'oxygène est puisé dans l'atmosphère, et le  $\text{CO}_2$  stocké dans la biomasse est libéré (figure (4.5)).



**Figure (4.5) :** Cycle neutre du carbone ( $\text{CO}_2$ ) lors de la valorisation énergétique de la biomasse.

## 4.4 La chaîne d’approvisionnement

Il sera question ici d’identifier et de décrire les principales étapes de la chaîne d’approvisionnement de la biomasse forestière pour la production d’énergie. La chaîne d’approvisionnement est un élément fondamental dans le développement de cette filière énergétique. Cette section s’articulera donc autour de la récolte, du séchage, du traitement, du transport, de la densification, de l’entreposage, du conditionnement et de la distribution, afin de procurer une description sommaire de ces étapes. Il faut noter que le scénario présenté ici ne représente pas tous les scénarios possibles quant à la chaîne d’approvisionnement de la biomasse forestière. Plusieurs variantes peuvent être observées, notamment au niveau des étapes subséquentes au transport. L’objectif ici est de dépeindre un portrait global.

### 4.4.1 La collecte

Les résidus d’exploitations agricoles et forestières sont souvent dispersés sur la parcelle d’exploitation (le champ ou la forêt). La collecte et le rassemblement peuvent être automatisés (pour les pailles de céréales par exemple) mais ces activités engendrent un coût. Pour que l’exploitation de ce type de biomasses soit intéressante pour la production d’énergie, il faut impérativement que les coûts de collecte et de transport soient relativement faibles. Les résidus des industries de transformation ont l’avantage d’être concentrés sur le lieu de l’entreprise. De plus, dans certains cas, leur valorisation énergétique permet d’éviter le coût de la mise en décharge. Ces résidus sont souvent valorisés au sein même de l’entreprise pour subvenir aux besoins en chaleur et/ou électricité de l’entreprise.



**Figure (4.6) :** Collecte de la biomasse.

#### 4.4.2 Le conditionnement

Les biomasses peuvent présenter des dimensions et formes qui rendent leur manutention et leur transport peu efficaces.

##### *a. Le broyage*

Les branches d'arbres -surtout si elles sont fourchues- en sont un bon exemple. Leur manutention est laborieuse et un conditionnement, même de grand volume, contient plus d'espace vide (air) et donc moins de combustible. Pour y remédier, la biomasse subit un conditionnement qui facilite sa manutention : le broyage. Il permet la production d'un combustible facilement transportable en plaquettes de bois par exemple.

##### *b. La densification*

La densification agglomère des biomasses de très petites dimensions (comme de la sciure de bois) en un combustible solide cohérent. En fonction de la forme de la machine, la biomasse est densifiée sous forme de briquettes, de bûchettes ou de granulés. Ces combustibles, plus denses que le matériau d'origine, se transportent plus facilement car ils occupent moins de volume pour un contenu énergétique égal.

##### *c. Un combustible adapté*

Souvent, les opérations de conditionnement de la biomasse produisent un combustible plus fluide que le produit de départ. Cela permet l'automatisation des chaudières et autres systèmes de valorisation énergétique : alors que des branches ou des bûches doivent être insérées manuellement dans une chaudière, des plaquettes ou des granulés de bois peuvent être introduits automatiquement dans une installation.

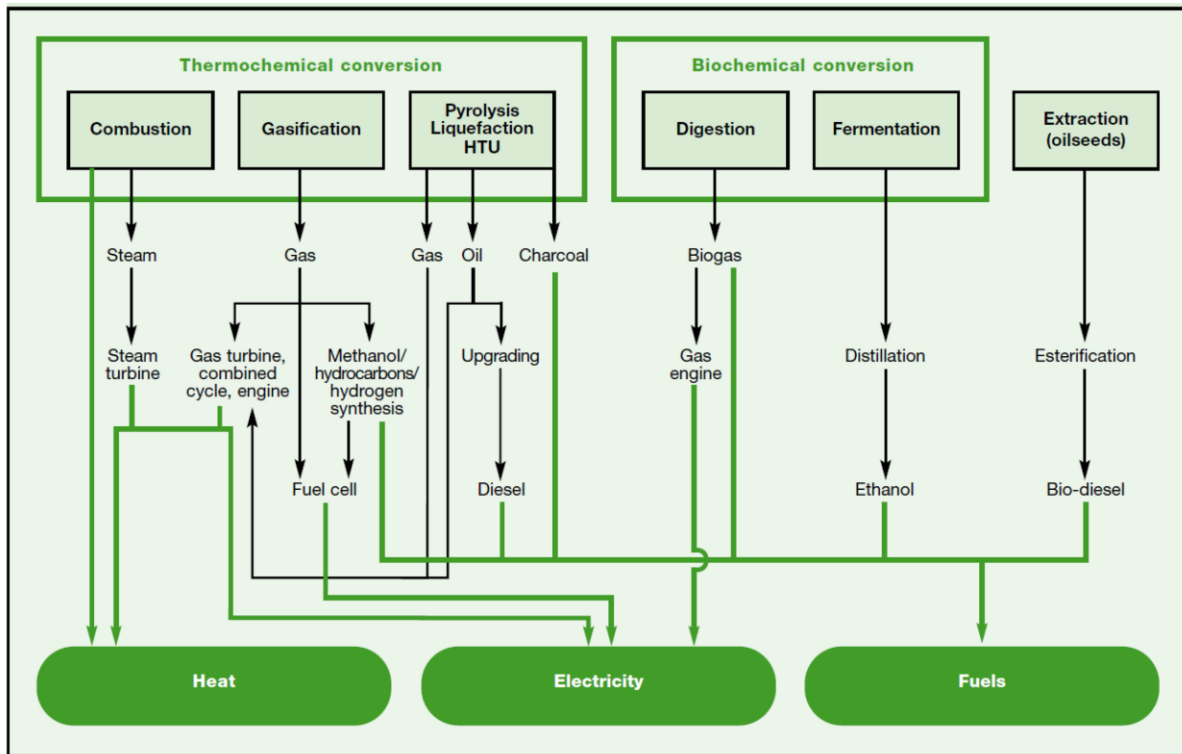
#### 4.4.3 Le transport

En fonction des besoins et des caractéristiques du produit, de nombreux moyens existent pour transporter la biomasse du lieu de production (exploitation forestière, usine agroalimentaire, etc.) au site de valorisation énergétique (centrale électrique, particuliers, etc.). Les particuliers transportent généralement leur bois de chauffe en voiture (avec remorque). Autre exemple, la centrale électrique des Awirs (près de Liège) est approvisionnée en granulés de bois par bateaux cargo entiers, puis par barges sur la Meuse.

La biomasse a un pouvoir calorifique inférieur à celui des combustibles fossiles. Ce qui veut dire que pour transporter une quantité équivalente d'énergie, la biomasse nécessitera plus d'espace.

## 4.5 La valorisation énergétique

La valorisation énergétique de la biomasse forestière est réalisée à l'aide de plusieurs procédés qui en finalité, produisent trois formes d'énergie : de la chaleur, de l'électricité ou du biocarburant (secteur des transports). Afin de valoriser la matière, plusieurs procédés sont actuellement disponibles. Ceux-ci se départagent principalement en deux catégories : les procédés thermochimiques (combustion, gazéification et pyrolyse/liquéfaction) et biochimiques (digestion et fermentation). Ces dernières sont illustrées à (la figure (4.7)).



**Figure (4.7) :** Aperçu des principales voies de valorisation de la biomasse.

Le rendement en termes de conversion en énergie de chacune de ces technologies varie et divers facteurs vont influencer le choix d'une de celles-ci, tels que :

- ✓ Les besoins réels en énergie ;
- ✓ La disponibilité, la proximité, tout comme la qualité de la biomasse ;
- ✓ Les coûts liés à la distribution puis à la transformation ;
- ✓ L'environnement dans lequel on se trouve ;
- ✓ Les techniques mobilisables pour utiliser le produit final suite au procédé appliqué.

Les technologies associées aux trois formes d'énergie ne sont pas toutes équivalentes en ce qui a trait à l'efficacité de conversion de la matière ligneuse en énergie (voir tableau 4.2). Il

est possible de constater que la production de chaleur est une voie de conversion où l'efficacité de conversion est élevée et compétitive face aux technologies qui sont associées aux combustibles fossiles. Cet aspect doit être considéré étant donné qu' « une unité d'énergie contenue dans le bois n'équivaut pas à une unité de consommation d'énergie, car l'efficacité de conversion de la biomasse forestière en une forme d'énergie utilisable dépend de la technologie utilisée. »

**Tableau 4.2 :** Efficacité de conversion des technologies pour la biomasse forestière et autres types de combustibles.

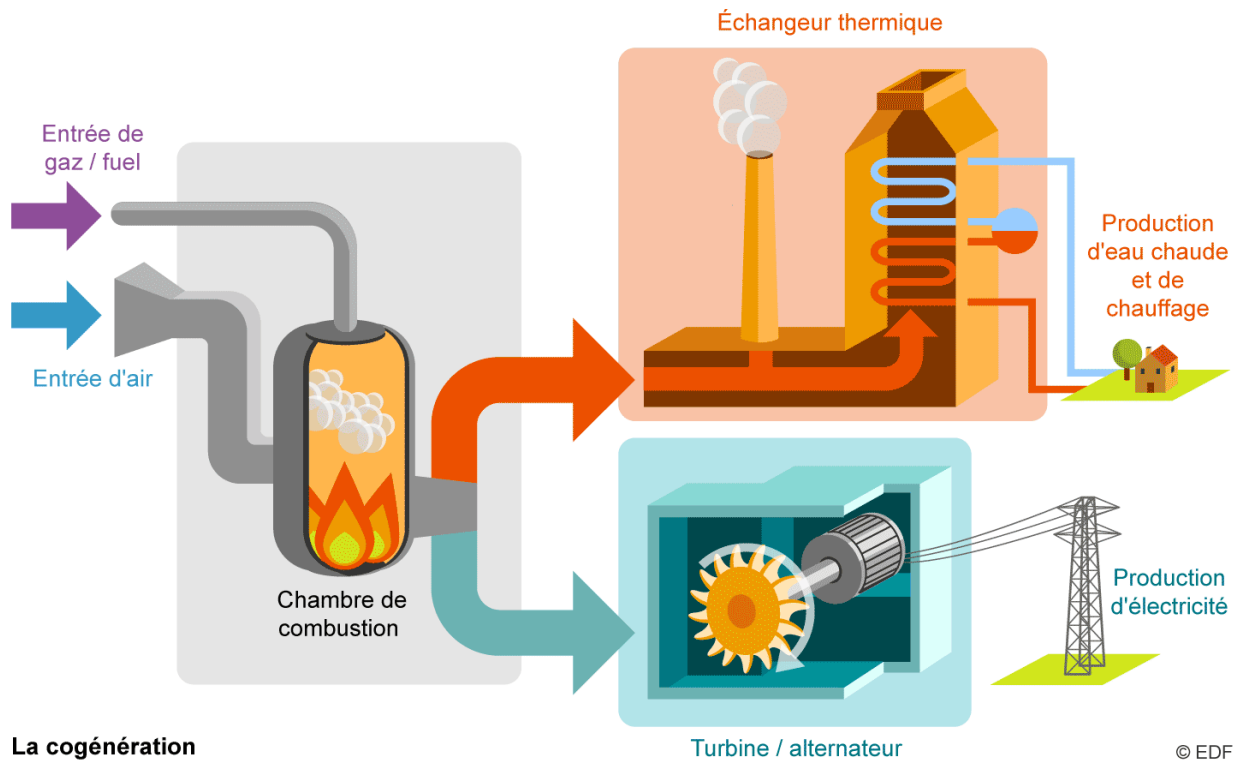
Voie de valorisation		Efficacité de conversion
Biocarburants		40 % - 45
Électricité Chaleur	Cogénération	25 % - 33 %
		85 %
Autres types de combustibles		
Mazout lourd		65 %
Mazout léger		75 %
Propane		85 %
Gaz naturel		85 %
Électricité		100 %

#### 4.5.1 Combustion directe

La combustion directe consiste essentiellement à brûler la biomasse forestière. Cette technique engendre l'entière oxydation à haute température (plus de 1000 °C) de la matière et nécessite un apport constant d'une grande quantité d'air. Cette matière, qui servira à alimenter les équipements de combustion, peut prendre la forme de plaquettes forestières, de granules de bois (à la suite de la densification), de résidus de scieries ou de bûches (figure (4.8)). Cette pratique nécessite donc des installations adaptées telles qu'une chaudière, un générateur d'air chaud ou un four à bois. Aussi, ce procédé a la capacité de produire séparément de la chaleur et de l'électricité, générée pendant le passage de la vapeur dans une turbine à vapeur, ou les deux simultanément. Dans ce dernier cas, on parlera alors de cogénération.



**Figure (4.8) :** Une chaudière (a), des plaquettes (b) et des granules (c)



**Figure (4.9) :** La cogénération.

#### 4.5.2 Gazéification

La transformation de la biomasse sous hautes températures (900 à 1050°C) en gaz de synthèse (syngas), décrit le procédé de gazéification qui se compose des étapes suivantes : séchage, pyrolyse, oxydation et réduction (figure (4.10)). Ces températures rendent optimale la production de gaz. Le procédé va décomposer la matière carbonée et former un syngas essentiellement composé de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. D'abord, le syngas généré doit impérativement être dépollué du goudron; résultat direct de la gazéification. Ensuite, celui-ci peut, par exemple, être utilisé à des fins de production de chaleur ou d'électricité en étant brûlé, ou être converti par catalyses en hydrocarbures, comme le diesel ou le méthanol (avec le procédé Fischer-Tropsch) ou en gaz vecteurs d'énergie comme le dihydrogène (H<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>).

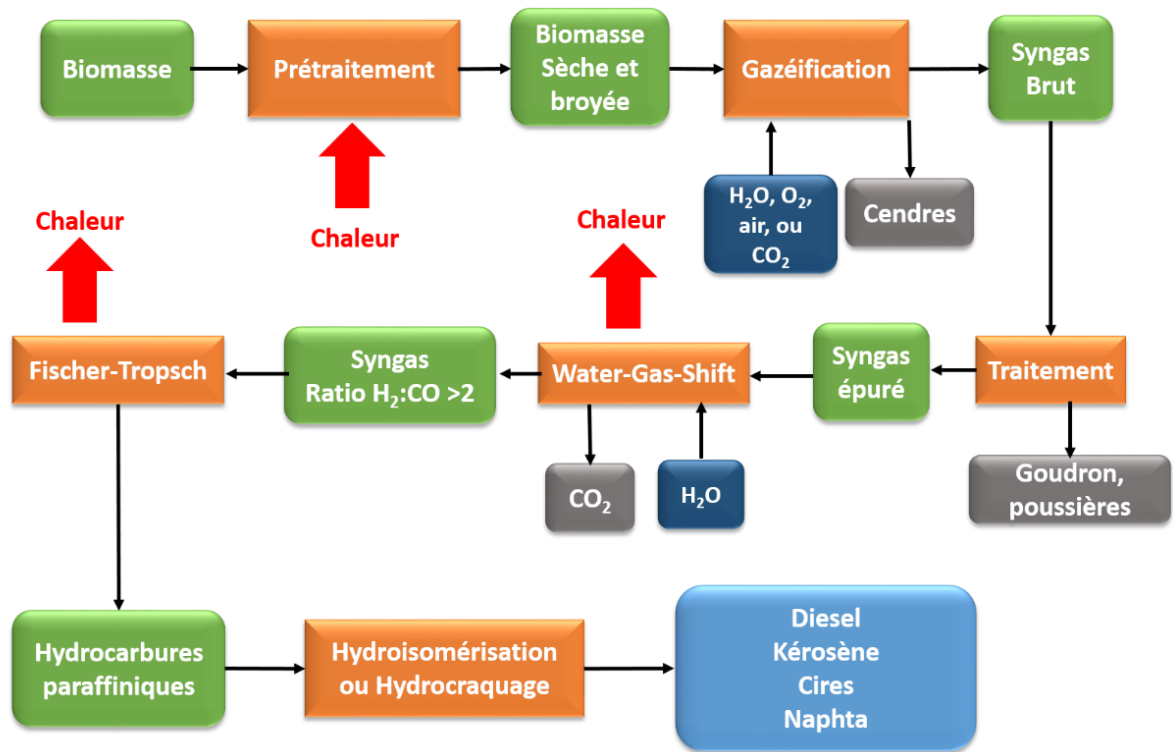


Figure (4.10) : La gazéification de la biomasse.

#### 4.5.3 Pyrolyse/liquéfaction

Durant la pyrolyse, la matière sera décomposée en conditions de chaleur (500°C) et d'absence d'oxygène (figure (4.11)). Cette technique permet d'abord d'obtenir un gaz qui sera par la suite refroidi rapidement pour donner de l'énergie densifiée sous forme liquide, de la biohuile ou huile pyrolytique, pour ainsi faciliter son transport, son entreposage et son utilisation. Cette biohuile est en réalité un condensat liquide noir. Outre ce liquide, une fraction solide (biocharbon) est également obtenue, mais en quantités moindres. Effectivement, la fraction liquide représentera de 60% à 70% de la biomasse initiale, alors que les fractions solide et gazeuse équivalent à 15 et 20% chacune. Cependant, certaines difficultés sont présentes lors de son utilisation en remplacement de carburants conventionnels en raison des propriétés physico-chimiques bien différentes de l'huile pyrolytique. Par exemple, celle-ci possède une forte teneur en eau et en composés oxygénés qui engendre une grande teneur en oxygène (35 à 40%) dans l'huile. Les composés oxygénés sont bien présents et font en sorte que la capacité calorifique de l'huile pyrolytique est 50% moins grande que celle des carburants conventionnels. Outre cela, d'autres propriétés comme son acidité élevée (pH entre 2 et 3), sa viscosité instable et sa teneur en solide (particules fines) limitent le potentiel commercial de l'utilisation de ce produit à ce stade.



Quant à la liquéfaction, celle-ci se produit à plus basse température (250 à 350 °C), mais à haute pression (10 à 20 Mpa). Dès lors, il est possible de convertir directement la matière lignocellulosique en biohuile.

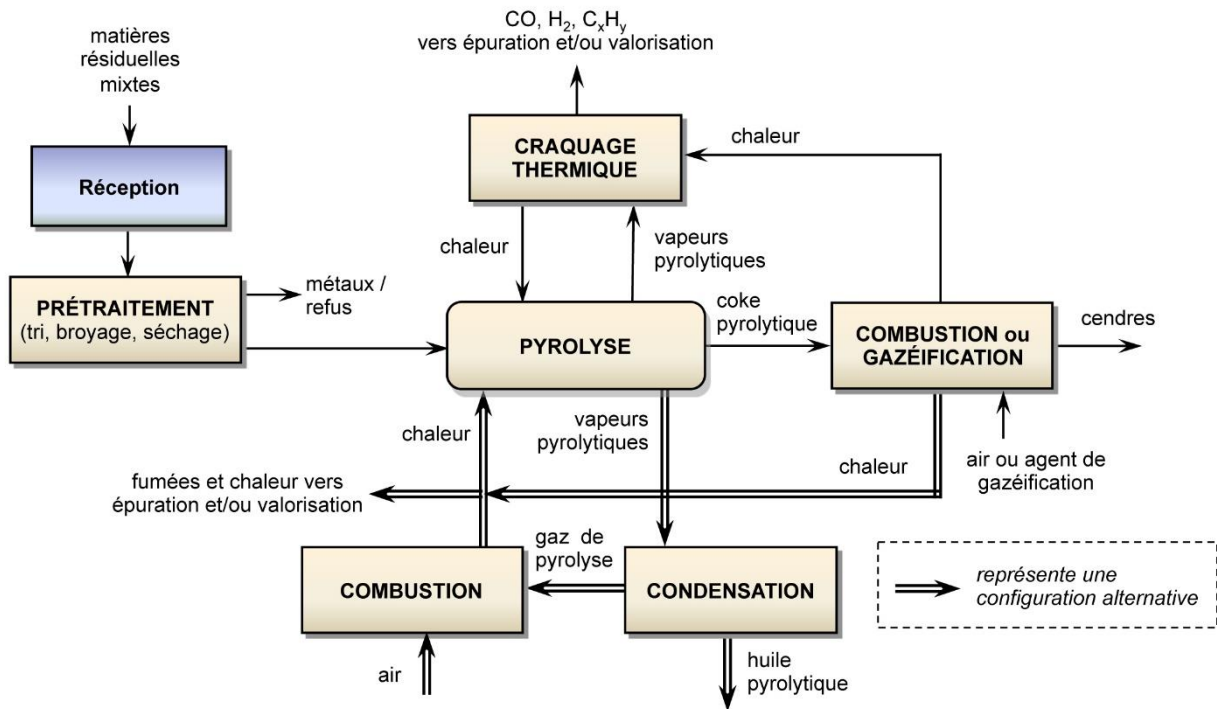


Figure (4.11) : Schéma du pilote de pyrolyse.

#### 4.5.4 Digestion

La digestion est la conversion de la biomasse par les bactéries en milieu anaérobique, donc en absence d'oxygène (figure (4.12)). Ce procédé génère du biogaz, composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone. La composition complexe du bois nuit à l'efficacité de sa conversion en biogaz. En effet, la matière est naturellement résistante à la dégradation anaérobique et plusieurs alternatives de prétraitement (ex. l'élimination de la lignine et la diminution de la cristallinité de la cellulose) sont envisagées pour diminuer sa complexité et sa résistance. Plusieurs défis restent à surmonter pour améliorer le rendement de ce procédé.



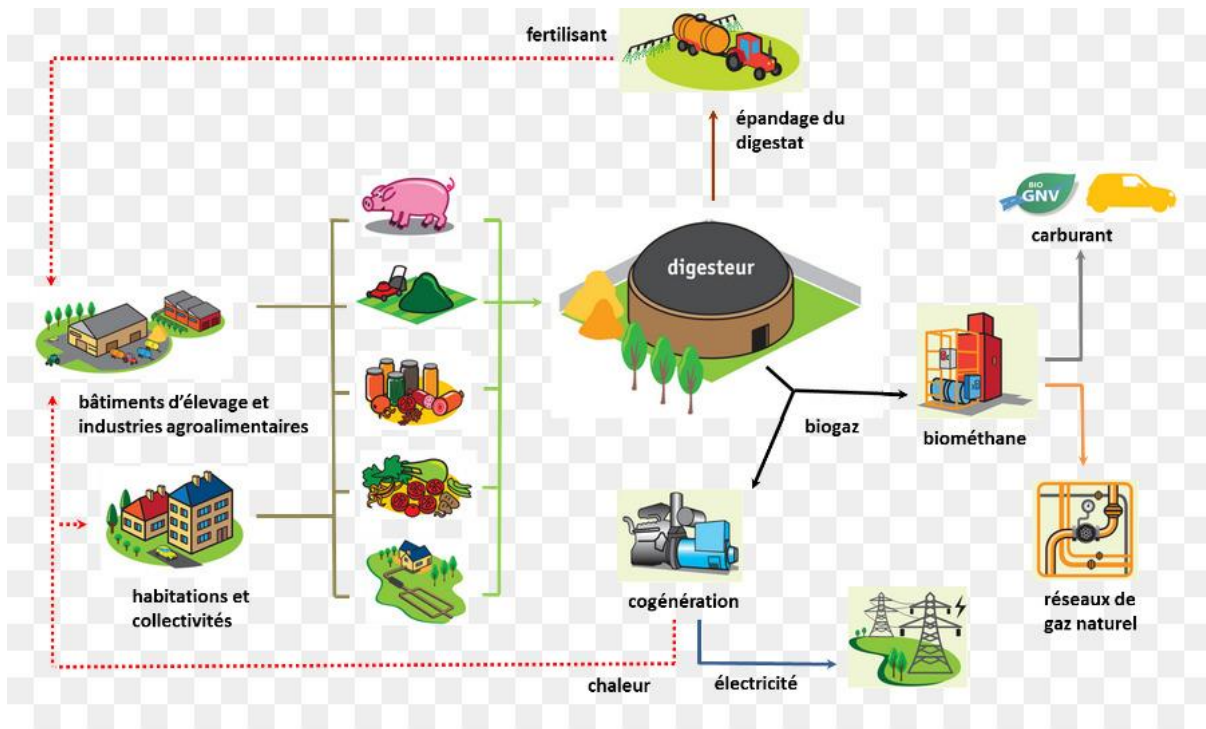


Figure (4.12) : Digestion de la biomasse.

#### 4.5.5 Fermentation

Comme pour la conversion de la matière végétale provenant de l'agriculture (ex. maïs), la conversion de la matière ligneuse en éthanol fonctionne selon le même procédé de base, c'est-à-dire la conversion des sucres en alcool. De manière générale, ce procédé implique d'abord une réaction d'hydrolyse pour libérer les sucres simples : les monosaccharides. Par la suite, la fermentation et la distillation permettront de produire de l'éthanol cellulosique (figure (4.13)). Cependant, semblablement à la digestion anaérobie, la conversion de la matière lignocellulosique avec ce procédé devient plus difficile en raison de la nature de sa composition. En effet, plusieurs molécules polysaccharidiques à chaîne plus longue se trouvent dans le bois. Ceci se traduit nécessairement par un gain en résistance et une plus grande complexité pour la conversion en un produit énergétique. Cette difficulté est absente en ce qui a trait à la production de l'éthanol de première génération avec les matières végétales agricoles. À la fin, l'éthanol cellulosique sera propice à être utilisé dans le secteur des transports comme biocarburant.

Contrairement à l'éthanol de première génération, dont la matière première provient du secteur agroalimentaire (blé, maïs, etc.), l'éthanol de deuxième génération à base de matière lignocellulosique ne met pas de pression sur le domaine de l'agriculture et sur les denrées alimentaires. Le développement de cette filière est donc considéré comme étant plus durable : il n'interfère pas avec des enjeux de sécurité alimentaire.

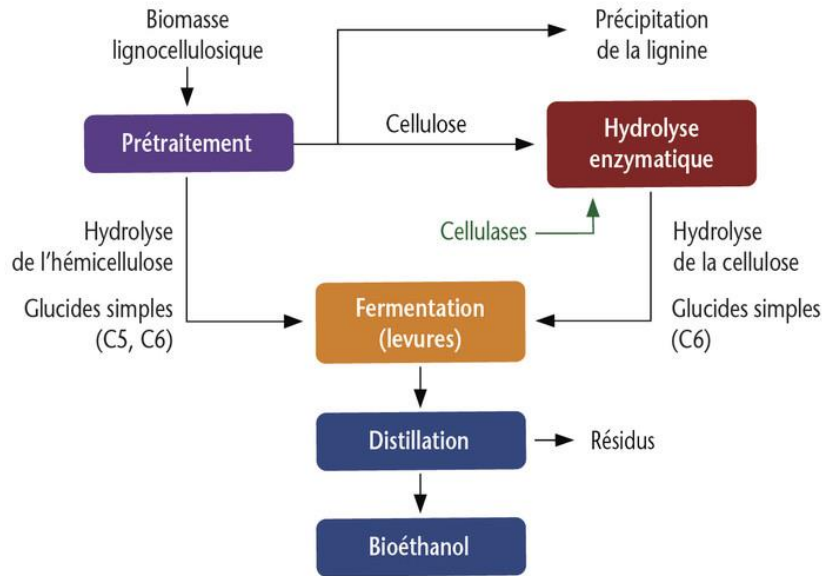


Figure (4.13) : Schéma synoptique de la fermentation.

#### 4.6 Les biomasses sucrées, amylacées ou oléagineuses

Les biomasses sucrées, amylacées (riches en amidon) ou oléagineuses (riches en huiles) peuvent être utilisées pour la production de biocarburants (figure (4.14)).

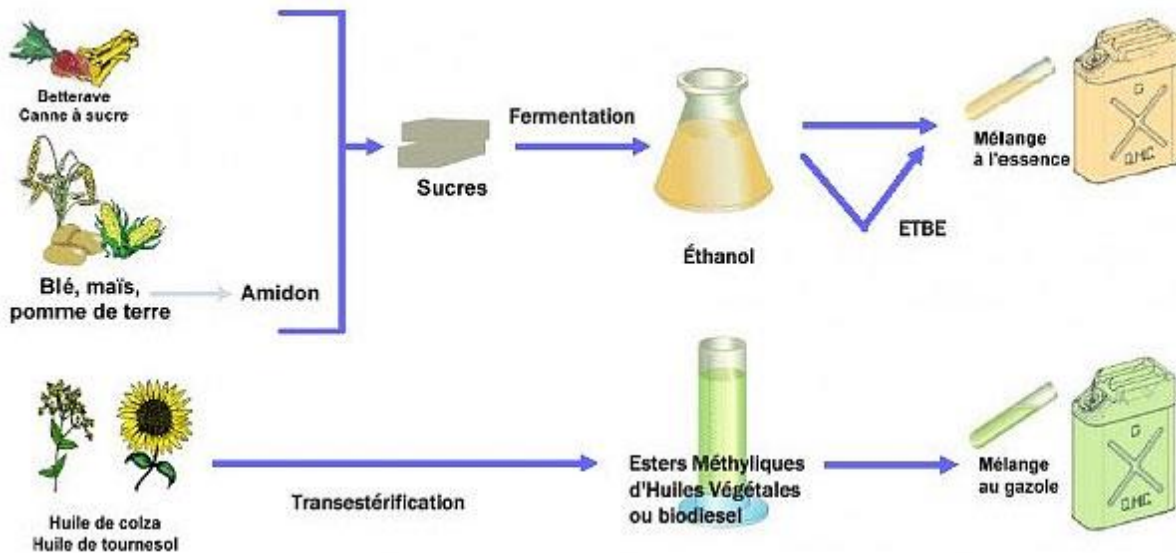


Figure (4.14) : procédé de traitement des biomasses sucrées, amylacées ou oléagineuses.

##### 4.6.1 L'éthanol

Les substances sucrées obtenues à partir de cultures comme la betterave sucrière, ou à partir de cultures amylacées comme les céréales, sont fermentées et converties en éthanol. Ce dernier est utilisé totalement ou en mélange dans les moteurs à essence.

La production de bioéthanol apparaît de plus en plus comme une alternative aux activités agricoles classiques tout en réduisant la dépendance énergétique européenne. En effet, le contexte de la réforme de la politique agricole commune (PAC) réduit les quotas de production et les cours mondiaux du sucre et des céréales sont généralement à la baisse.

#### 4.6.2 L'huile végétale ou le biodiesel

Les cultures oléagineuses (colza, tournesol, etc.) sont utilisées pour produire de l'huile végétale ou du biodiesel. Ces biocarburants s'utilisent purs ou en mélanges dans les moteurs diesel. D'autres corps gras peuvent être employés pour produire du biodiesel, comme les huiles de friture usagées ou même les graisses animales (déchets d'abattoirs).

### 4.7 Conclusion

La biomasse n'est certainement pas, à elle seule, l'énergie du futur; cela ne veut pas dire qu'il faut mépriser ce qu'elle peut apporter en termes d'économie d'énergies fossiles importées et de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre.

On peut citer des avantages et inconvénients suivant :

- ✓ La bioénergie, exploitée de manière durable et renouvelable, ne participe pas au réchauffement climatique grâce à son cycle neutre du carbone.
- ✓ La biomasse est biodégradable, les risques de pollution sont très réduits.
- ✓ Les activités de production, de collecte, de conditionnement, de transport et de vente de la biomasse maintiennent et créent de nombreuses activités et emplois directs et indirects, principalement en zones rurales.
- ✓ Tout comme le mazout ou le gaz, le bois de chauffe doit être transporté de sa zone de production à son lieu d'utilisation. Si cette distance est trop importante, les coûts de transport et de mobilisation seront trop élevés.
- ✓ Attention, il est important de n'utiliser que du bois sec et propre (c'est-à-dire pas de bois traité de récupération) dans les installations de chauffage au bois. L'utilisation de bois humide et/ou de bois traité, à l'encontre des recommandations du constructeur, peut mener à des émissions de substances nocives.
- ✓ Toute installation de combustion peut émettre du CO et des particules fines nocives pour la santé. Si plusieurs précautions sont prises (filtre à particule, qualité du combustible, bons réglages) les équipements à la biomasse peuvent dégager une quantité égale ou moindre aux équipements de combustion classique (gaz, mazout).

# **C H A P I T R E 5**

**Stockage, pile à combustibles et  
hydrogène**

## 5.1 Introduction

Le caractère intermittent des sources des énergies renouvelables pose des problèmes en termes de stabilité, de qualité ou encore de sécurité de fonctionnement des réseaux électriques auxquels elles sont raccordées. Pour surmonter le problème de la disponibilité de l'énergie, les systèmes de stockage qui stockent l'énergie sont utilisés comme solution à ces problèmes. Le stockage de l'énergie à travers l'utilisation de combustibles fossiles est aisé. Il n'en est pas de même avec l'électricité, appelée à jouer un rôle de plus en plus important en substitution, qui ne se stocke pas directement, mais qui doit passer à travers des transformations réversibles (potentiel gravitaire, électrochimique, cinétique...).

Les moyens de stocker l'énergie électrique sont divers et variés et peuvent être classés dans différentes catégories en fonction de leurs performances (capacité de stockage, énergie/puissance, ...) et de leurs caractéristiques : stockage centralisé ou décentralisé, direct ou indirect. Le stockage est dit « centralisé » lorsque le moyen de stockage est couplé au réseau de distribution de l'énergie électrique. Il est « décentralisé » lorsque le dispositif de stockage est embarqué dans un dispositif mobile et autonome en termes d'énergie. On distingue également le stockage direct et indirect. Pour le stockage « direct », l'énergie est stockée sous sa forme électrique. Dans le cas d'un stockage « indirect », l'énergie est stockée sous une autre forme : électrochimique, mécanique ou gazeuse (air, hydrogène), nécessitant une conversion réversible pour passer d'une forme à une autre (figure (5.1) et (5.2)).

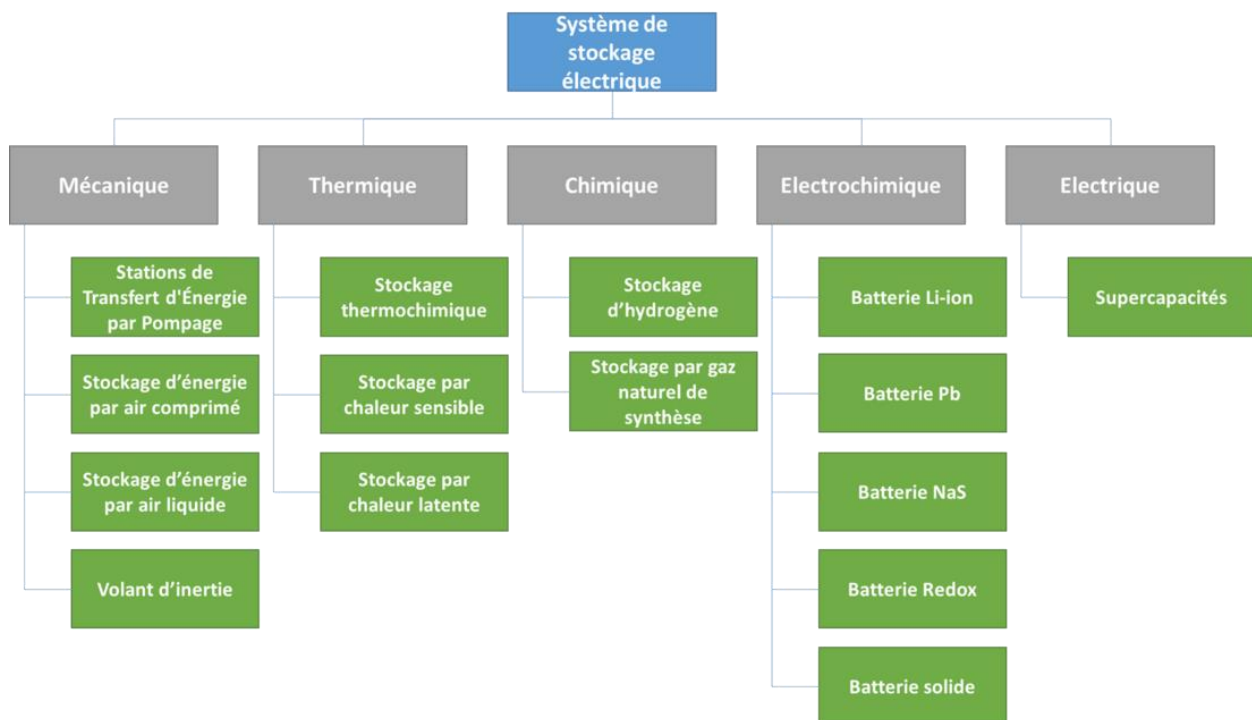


Figure (5.1) : Vue de l'ensemble des moyens de stockage d'énergie.

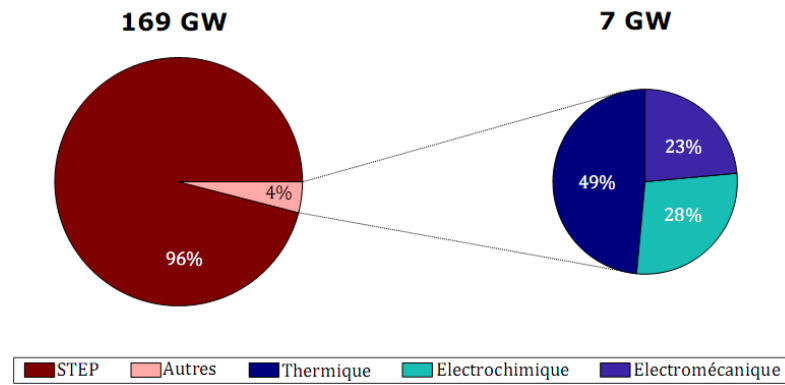


Figure (5.2) : Capacités de stockage installées dans le monde à la mi-année 2017.

## 5.2 Stockage de type mécanique

Le stockage de type mécanique regroupe l'ensemble des technologies qui stockent l'énergie sous forme d'énergie potentielle ou d'énergie cinétique.

### 5.2.1 Historique de développement du stockage d'énergie par pompage

Les premières STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) ont pris naissance au début du XXe siècle dans le contexte de systèmes électriques locaux, non interconnectés, souvent constitués d'un couple : ville-centrale hydroélectrique. Il s'agissait de répondre aux pics de demande électrique des villes, en pompant la nuit pour restituer de l'énergie sur le réseau en heure de pointe. La première STEP pourrait avoir été celle de Ruppoldingen en Suisse, sur l'Aar, en 1902. La première STEP en Allemagne serait celle de Niederwartha, mise en service en 1929. La STEP des Lacs Blanc et Noir, dans les Vosges, a été construite en 1933-34, en liaison avec l'usine hydroélectrique de Kembs sur le Rhin, pour les besoins de la ville de Mulhouse ; sa mise en service a été retardée jusqu'en 1938 à cause d'un accident.

Une seconde vague de développement des STEP se situe dans les années 1970-1990, en lien avec les constructions des grandes centrales de production d'électricité, nucléaires ou centrales à charbon, qu'il est plus intéressant de faire fonctionner le plus longtemps possible, comme toutes les installations ayant un coût d'investissement élevé. La STEP en est alors le complément. Les STEP de Ludington (États-Unis, 1976), Dinorwig (RU, 1984), Guanzhou (Chine, 2000) ont été construites pour répondre à ce besoin.

Une troisième vague de développement a commencé au début du XXIe siècle, la STEP répondant aux besoins de flexibilité des systèmes électriques, et le stockage d'énergie se trouvant susceptible de favoriser ou même rendre possible l'intégration des énergies renouvelables

intermittentes. Ce développement concerne notamment l'Europe et plus récemment l'Asie (Chine).

**a. STEP – Station de transfert d'énergie par pompage**

Le pompage-turbinage ou STEP est une méthode de stockage hydraulique grâce à la gravité. Le stockage d'énergie par pompage a été développé pour optimiser le fonctionnement des grandes centrales électriques dans les réseaux interconnectés, en face d'une demande en électricité variable dans le temps (heures pleines/heures creuses). Au début du XXIe, ce stockage d'énergie fait l'objet d'une nouvelle vague de développement, importante, en lien avec le développement des énergies renouvelables. Parmi elles, la Station de Transfert par Énergie Potentielle (STEP) est la technologie de stockage de grande capacité la plus mature à l'heure actuelle (Tableau 5.1).

**Tableau 5.1 :** Quelques exemples de STEP de plus de 1000 MW en turbinage.

Centrales	Pays	Hauteur chute d'eau [m]	Puissance de pompage [MW]	Puissance de turbinage [MW]	Année de mise en service
Ludington	Etats-Unis	113		1872	1973
Vianden	Luxemborg	266 à 291	850	1096	1976
Dinorwig	Royaume-Uni	?	1650	1728	1984
Grand Maison	France	822 à 955	1160	1790	1987
Guangzhou	Chine	? à 535	?	2400	2000
Goldisthal	Allemagne	302	≈ 1000	1060	2003
Bath County	Etas-Unis	353 à 403	2876	3000	2004

Il s'agit de la technologie de stockage de masse de l'énergie électrique, de très loin, la plus répandue dans le monde (plus de 150 GW de puissance installée). Son coût d'investissement, ramené à la capacité, est parmi les plus bas et sa durée de vie très longue. Cependant, les contraintes environnementales et sociales entravent souvent les nouvelles constructions, ce qui limite leur développement. Mais il reste envisageable de transformer des usines hydroélectriques existantes, équipées de barrage (réservoir haut) et auxquelles il resterait à adjoindre un réservoir de plus faible capacité au niveau inférieur (on disposerait alors d'une puissance élevée et la seule restriction serait une asymétrie de capacité énergétique lors de la recharge). Compte tenu de cette possibilité d'aménagement de barrages existants, le potentiel technique européen, de la capacité de stockage permise par les STEP, a été évalué à plus de 80 TWh. La figure (5.3) montre la STEP de Revin dans les Ardennes.





**Figure (5.3)** : La STEP de Revin dans les Ardennes, réservoirs de 7 millions de m<sup>3</sup>, dénivelé 230m (puissance jusqu'à 800 MWh),

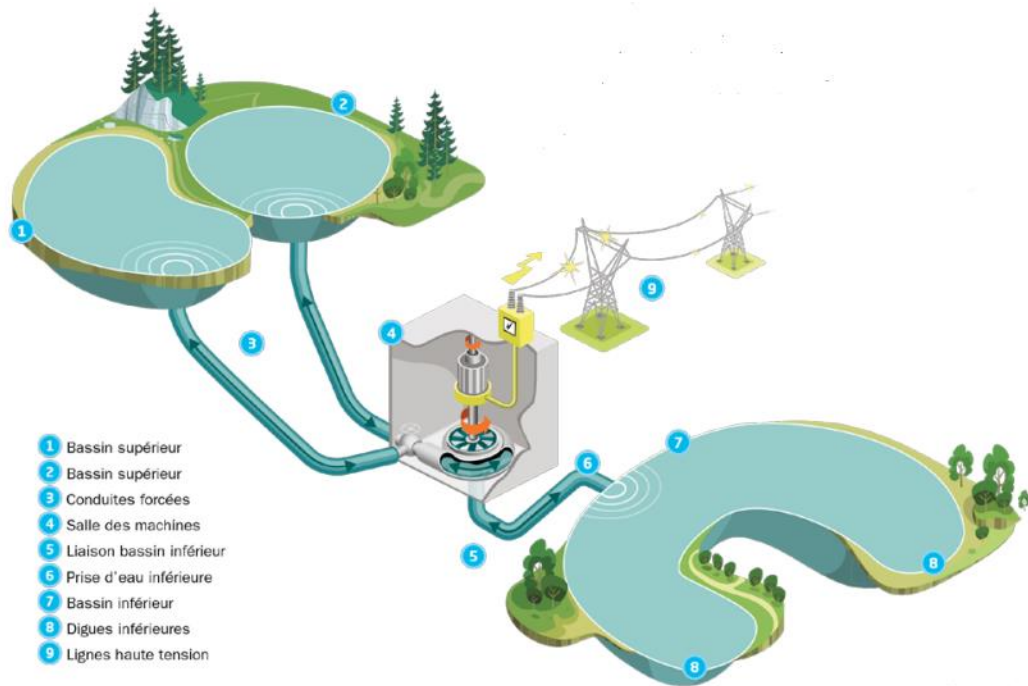
### ***B. Principes et description***

Une STEP est une installation hydroélectrique dispose d'un réservoir inférieur et d'un réservoir supérieur. Une conduite appelée « conduite forcée » munie d'une turbine réversible relie ces bassins. Le principe de fonctionnement est donné sur la figure (5.4).

- ✚ En mode stockage : en période de surplus de production, l'eau est ainsi pompée du bassin inférieur vers le bassin supérieur à l'aide de la turbine.
- ✚ En mode production : À l'inverse, en période de pic de consommation, l'eau est turbinée, c'est-à-dire qu'elle emprunte la conduite forcée depuis le réservoir supérieur et permet de faire tourner la turbine. Sur l'axe de la turbine, se trouve un générateur qui permet de transformer la rotation en électricité.

Ce type de centrale est privilégié dans les régions utilisant l'énergie nucléaire, les centrales fonctionnant en continu. Les STEP permettent ainsi de stocker la surproduction nocturne. C'est d'ailleurs pour du stockage jour/nuit que celles-ci sont dimensionnées.





**Figure (5.4) :** Principe de fonctionnement d'une STEP.

L'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de gravité. Un volume d'eau  $V$  existant à une certaine altitude  $H$  au-dessus de la mer correspond en effet à une énergie potentielle :

$$E_p = \rho g V H \quad (5.1)$$

Avec :  $\rho$  : masse volumique de l'eau,  $g$  : accélération de la pesanteur.

Entre deux réservoirs dont les niveaux seraient à des altitudes différentes de  $H_b$ , appelé hauteur de chute brute, il y aurait donc une différence d'énergie potentielle :

$$E_p = \rho g V H_b \quad (5.2)$$

Avec :  $V$  : volume d'eau qu'il est effectivement possible de transférer d'un réservoir à l'autre, et inversement. Ce volume  $V$  dépend des capacités des réservoirs, sachant qu'un réservoir donné est caractérisé par un niveau d'eau minimal (au-dessous duquel on s'interdit de descendre) et d'un niveau maximal.

### c. Les avantages STEP

Les principaux avantages de cette technologie sont les suivants :

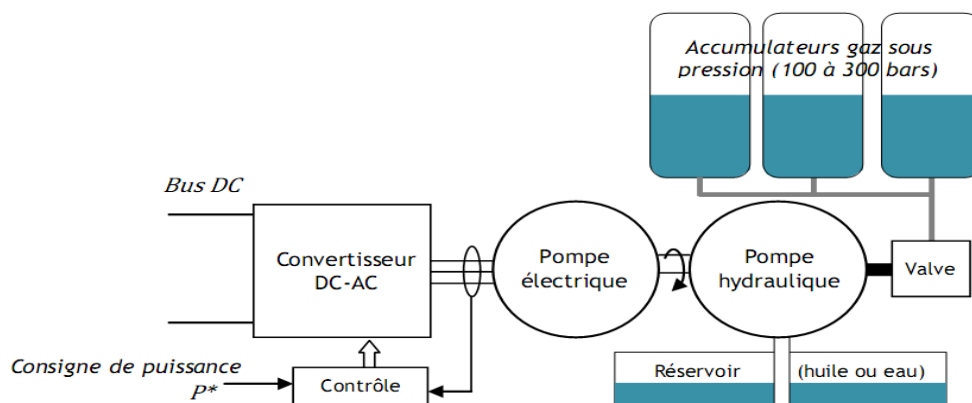
- ✓ Une amplitude de la capacité de stockage importante : la STEP de Bath County aux États-Unis est la plus grande station existante avec une capacité de stockage avoisinant les 31GWh ;
- ✓ Une longue durée de vie de l'installation, supérieure à 50 ans ;

- ✓ L'efficacité moyenne de l'ordre de 70% et qui peut atteindre 85 % pour les installations les plus modernes ou remises à niveau avec notamment l'utilisation de la vitesse variable;
- ✓ La possibilité de rendre plusieurs services au réseau, du service journalier jusqu'au service intersaisons.

## 5.2.2 Stockage hydropneumatique

Le stockage hydropneumatique consiste à mettre sous pression un gaz (air ou azote) dans un réservoir par l'intermédiaire d'un compresseur électrique (figure (5.5)). La compression d'un gaz (ici, durant la charge) a tendance à produire beaucoup de chaleur, et sa détente (en phase de décharge) du froid. Pour obtenir un rendement élevé, un fluide intermédiaire (huile ou eau) est préférable (système hydropneumatique), les phases de compression et détente peuvent être alors quasi isothermes. Les accumulateurs à haute pression et les motopompes sont des technologies matures dans les utilisations directes de l'énergie hydraulique. Leur transposition à des applications électriques est plus récente. Une solution pour obtenir un bon rendement sur toute la plage de pression de fonctionnement est étudiée et consiste à hybrider ces systèmes avec des super-condensateurs ou un volant d'inertie pour assurer les variations rapides de puissance.

Pour les systèmes à cycle fermé, la masse d'air est constante, et l'énergie volumique relativement faible, environ 300 kWh/m<sup>3</sup> avec des réservoirs sous 300 bars. Les rendements sur cycle peuvent atteindre 75%, les puissances envisagées, pour des constantes de temps de l'ordre de l'heure à quelques heures, sont comprises entre 100 kW et 1MW. Pour les systèmes à cycle d'air ouvert, la masse d'air varie, les transformations isothermes sont réalisées par des échangeurs de chaleur intégrés. Les pressions de travail vont de 100 à 300 bars, l'énergie volumique des réservoirs varie de 40 à 60 kWh/m<sup>3</sup> pour des pressions maximales de 250 à 350 bars. Les rendements sur cycle sont alors de l'ordre de 60%, et les valeurs de puissance envisagées, pour des constantes de temps plus flexibles de quelques minutes à quelques jours, sont comprises entre 5 et 500 kW.



**Figure (5.5) :** Principe d'un système de stockage hydropneumatique à circuit d'air fermé,

### 5.2.3 Stockage par air comprimé CAES

Le stockage d'air comprimé (CAES compressed air energy storage) représente une technologie déjà relativement mature avec plusieurs réalisations de grande puissance. On sait qu'une turbine à gaz classique utilise près des deux tiers de la puissance disponible sur l'arbre pour la compression de l'air de combustion. Il apparaît donc possible, en séparant les processus dans le temps, de comprimer l'air lors du stockage puis de produire, pendant les heures de déstockage, une puissance trois fois plus importante pour la même consommation de combustible.

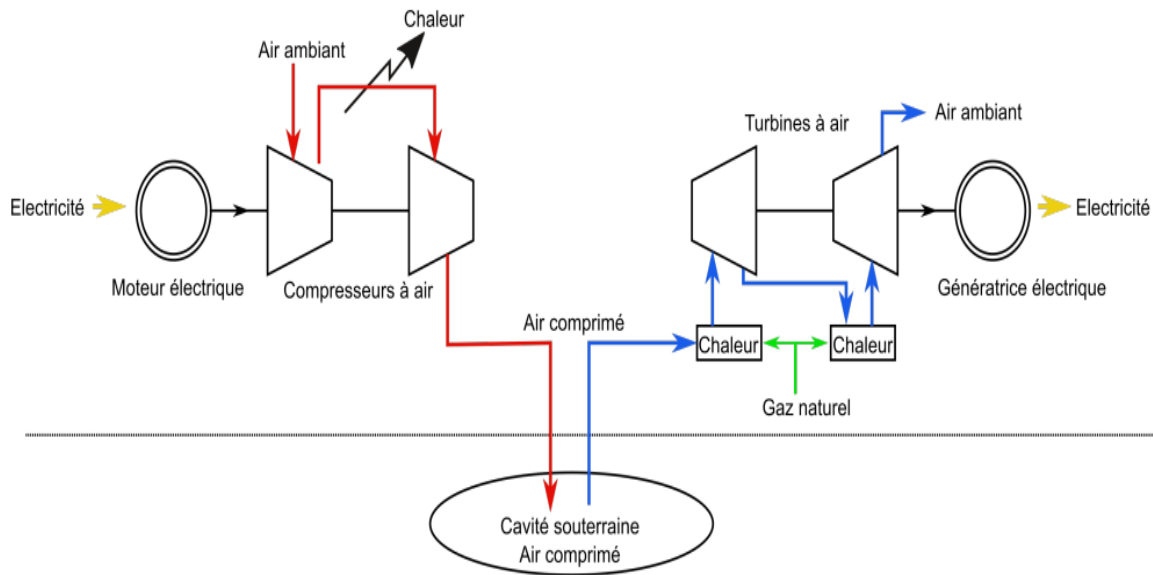
En effet, l'air comprimé doit être stocké à forte pression (40 à 70 bars) et à une température proche de l'ambiante, cela afin de réduire son volume massique et diminuer ainsi le volume du réservoir de stockage. Cependant, les volumes stockés restent très importants. Par exemple, pour une unité de 250 MW ayant une autonomie de 6 à 8 heures, il faut environ 500000 m<sup>3</sup>. Pour cette raison, il n'est ni pratique, ni économique d'utiliser des réservoirs sous pression en surface ; il faut envisager donc un stockage d'air comprimé souterrain, pouvant bénéficier de pressions géostatiques (poids des terrains au-dessus des cavernes) qui facilitent le confinement de la masse d'air stockée.

#### *a. Principe de fonctionnement*

Le principe de la conversion énergétique du CAES repose sur l'utilisation de compresseurs mécaniques pour la compression d'air et de turbines mécaniques pour la détente de l'air. Le fonctionnement est représenté sur la figure 5.6 et les étapes sont détaillées ci-après :

- ✚ **En phase de stockage**, l'énergie électrique excédante alimente un moteur électrique qui permet d'actionner deux compresseurs successifs disposés sur le même arbre de rotation. De l'air ambiant est admis dans le premier compresseur où il subit un premier niveau de compression. Cet air est ensuite acheminé dans le second compresseur qui assure la suite de la compression jusqu'à ce que l'air comprimé atteigne la pression requise pour être stocké. La compression d'air au sein des compresseurs s'accompagne d'un dégagement de chaleur pouvant atteindre 700°C qui est dissipé dans le milieu environnant. L'air comprimé est ensuite acheminé vers la caverne souterraine dans laquelle il est maintenu.
- ✚ **En phase de production d'électricité**, une quantité d'air comprimé du réservoir est remontée à la surface. Cet air comprimé est froid et la détente de l'air s'accompagne d'un refroidissement de l'air. Or, le fonctionnement sain des turbines à air nécessite que la température de l'air à l'intérieur soit toujours supérieure à 0°C sans quoi l'eau devient

gelée et risque de casser la turbine. Ainsi, une étape supplémentaire permet de réchauffer l'air grâce à l'utilisation d'une chambre de combustion alimentée par l'apport de gaz naturel. L'air réchauffé est ensuite admis dans la première turbine où il subit une première détente. L'air s'est refroidi au cours de cette détente donc il est envoyé dans la seconde turbine après le passage dans une seconde chambre de combustion. La seconde turbine assure la détente de l'air jusqu'à la pression atmosphérique. La détente de l'air dans les turbines actionne un générateur et permet la production d'énergie électrique.



**Figure (5.6) :** Principe de fonctionnement d'un système de stockage CAES.

### 5.2.4 Le stockage inertiel

L'idée de stocker de l'énergie à l'aide d'un mobile en mouvement est ancienne (plusieurs milliers d'années). Le premier brevet concernant le volant d'inertie a été déposé en 1868 par Louis Guillaume Perreaux de l'Orne. C'est au XX<sup>ème</sup> siècle que le volant d'inertie sera étudié avec intérêt pour le stockage de l'énergie sous forme cinétique. Les volants d'inertie sont des éléments de stockage mécanique, indirect, considérés comme des sources de puissance élevée. Un volant d'inertie est un système constitué d'une masse cylindrique et d'un moteur/alternateur. Lorsque cette masse est mise en rotation, l'énergie électrique transmise par le moteur au cylindre est stockée en énergie cinétique.

#### *a. Principe de fonctionnement*

L'énergie électrique est utilisée pour accélérer un volant entraîné par une machine électrique (en fonctionnement moteur). Le stockage de l'énergie est alors réalisé sous forme cinétique de rotation. L'énergie stockée est restituée par la machine électrique (en fonctionnement générateur) entraînée par le volant d'inertie. Le dispositif est donc constitué

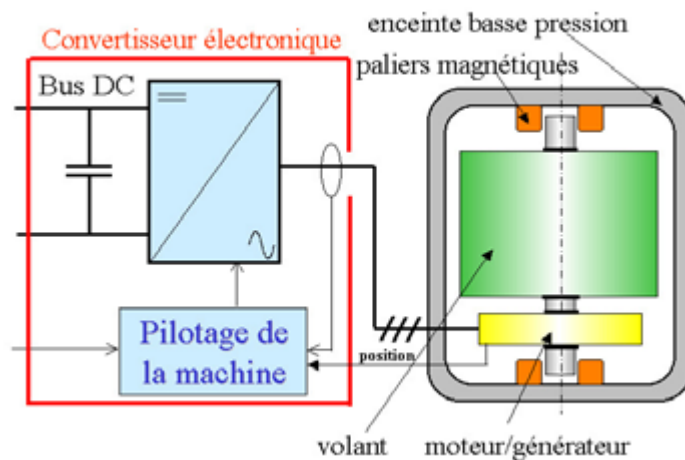
d'un volant d'inertie plus paliers, d'une machine électrique, d'une électronique de puissance associée et d'une enceinte de protection (figure (5.7)). L'énergie cinétique emmagasinée par un volant en rotation est donnée par l'expression classique :

$$E_c = \frac{1}{2} Jw^2 \quad (5.3)$$

Avec :  $J$  : moment d'inertie,  $w$  : vitesse de rotation.

La quantité d'énergie pouvant être stockée par ce système va dépendre de la vitesse de rotation du cylindre d'une part, et de son moment d'inertie d'autre part, c'est-à-dire de sa masse et sa distance par rapport à l'axe de rotation. La vitesse étant limitée par des contraintes mécaniques, il existe deux types de volants :

- ✚ **Les volants d'inertie à basse vitesse en acier** : le matériau utilisé est moyennement résistant aux contraintes mécaniques mais il est relativement lourd.
- ✚ **Les volants d'inertie à haute vitesse en fibre de carbone** : ce matériau est plus léger que l'acier mais résiste mieux aux contraintes et peut donc atteindre une vitesse plus élevée.



**Figure (5.7)** : principe d'un accumulateur à volant d'inertie

Le stockage des volants d'inertie cités ci-dessus est un stockage de courte durée. Le temps de charge/décharge du cylindre est de l'ordre de quelques minutes. Lorsque le moteur cesse sa mise en rotation, le cylindre peut garder l'énergie stockée entre 15 à 30 minutes, avec un rendement allant de 85% à 90%. En cas de besoin, le moteur devient alternateur et reconvertit l'énergie cinétique du cylindre en énergie électrique à injecter dans le réseau. Pour atteindre un tel rendement, un travail est fait pour minimiser les frottements du cylindre en rotation. En général, celui-ci est placé dans une enceinte sous vide et le raccord rotor/stator se fait via un palier magnétique ou un roulement à bille haute performance. Cette technologie est pourvue

d'une puissance très élevée, mais l'énergie disponible est-elle limitée. Elle répond donc au besoin de lissage des irrégularités de production/consommation dans le contexte des énergies renouvelables.

### 5.3 Le stockage thermique

Le stockage d'énergie thermique a connu ses premières heures de gloire dans les années 80, suite au premier pic pétrolier de 1973. Après ce premier engouement, et tandis que le pétrole redevient bon marché, l'intérêt porté au stockage d'énergie thermique s'estompe. Le stockage thermique consiste à stocker l'énergie électrique sous forme de chaleur au sein de matériaux spécifiques par élévation de la température de ce matériau ou bien par changement d'état. Ce type de stockage est intéressant pour le stockage massif, car il est destiné aux applications supérieures au MW. Toutefois, aujourd'hui, il est principalement étudié pour une revalorisation de la chaleur stockée dans les réseaux de chaleur et non pas pour être reconvertie en électricité.

#### 5.3.1 Les différents types de stockage thermique

Trois phénomènes physiques sont distingués et permettent de classer les systèmes de stockage : l'échauffement, le changement de phase ou d'état et les réactions chimiques endo/exothermiques. Le stockage thermique peut donc se présenter sous trois formes différentes:

- ✓ Stockage par variation d'enthalpie sensible.
- ✓ Stockage par enthalpie de changement de phase.
- ✓ Stockage thermochimique.

##### *a. Le stockage d'énergie par variation d'enthalpie sensible*

C'est le procédé le plus simple : on chauffe un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc.) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turboalternateur. Ce type de stockage se présente sous deux formes. La première consiste en une augmentation de la température du milieu de stockage (liquide ou solide) par contact direct ou indirect avec un fluide caloporteur. Il s'agit d'un procédé non isotherme dans lequel l'énergie absorbée/libérée par le milieu de stockage est proportionnelle à la diminution/l'augmentation de température du fluide caloporteur. Dans la seconde forme, le fluide caloporteur est à la fois le fluide de travail et le matériau de stockage. C'est le cas, par exemple, des ballons d'eau chaude dans les habitations.

La quantité d'énergie thermique stockée s'exprime avec la relation suivante :

$$\Delta E = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.4)$$

Où,  $m$  : est la masse [kg],  $C_p$  : la capacité calorifique massique à pression constante [J/(kg K)] et  $\Delta T$  : la différence de température [K] entre un état initial et un état final.

***b. Le stockage d'énergie par changement de phase***

Le principe du stockage via des matériaux à changement de phase (MCP) consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur. Par exemple, la paraffine. Placée dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'eau. Lorsque l'eau chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, la paraffine va céder sa chaleur en se resolidifiant si c'est de l'eau froide (autour de 15°C) qui circule dans le tube.

***c. Stockage thermochimique couplé à un système solaire thermique***

Le principe repose sur l'utilisation d'un réactif (bromure de strontium pour des installations dans l'habitat), stocké dans une cuve. **En période estivale**, l'eau chaude apportée par le système solaire combiné va céder sa chaleur à l'air apporté de l'extérieur via l'échangeur eau-air. Cet air chaud va ensuite permettre d'assécher le réactif. Le réactif peut être conservé sec pendant plusieurs mois. **En période hivernale**, le circuit est inversé, l'air extérieur frais et humide circule à travers le réactif qui, en se réhumidifiant, va dégager de la chaleur grâce à une réaction chimique exothermique. L'air ainsi chauffé (autour de 70°C) passe dans l'échangeur et cède sa chaleur à l'eau qui va circuler jusqu'au ballon et permettre une utilisation sanitaire. En première approche, l'ordre de grandeur de la densité énergétique des systèmes thermochimiques est cinq fois plus important que les systèmes par changement de phase qui ont eux-mêmes une densité de stockage de deux à trois fois plus élevé que les systèmes sensibles.

## **5.4 Les systèmes de stockage électrochimique**

Il existe en fait deux types de générateurs électrochimiques. Dans le premier cas, on parle généralement de piles pour évoquer des générateurs irréversibles, c'est-à-dire lorsque l'une des électrodes est consommée par une réaction d'oxydo-réduction spontanée. Dans le second cas, on désigne par accumulateurs des générateurs électrochimiques réversibles. Pour cela, il faut que le système électrochimique puisse jouer le rôle d'un récepteur en se chargeant grâce à l'énergie électrique apportée par un autre générateur et revenir à son état initial. Le terme de batteries ne permet pas de définir la nature réversible ou non du système électrochimique. Les batteries correspondent à une mise en série ou en parallèle de piles ou d'accumulateurs.

### 5.4.1 Accumulateurs électrochimiques

Dans les accumulateurs électrochimiques, l'énergie est stockée sous une forme électrochimique, ce qui nécessite une conversion (réaction électrochimique) pour stocker ou restituer de l'énergie électrique (stockage indirect). Un accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur.

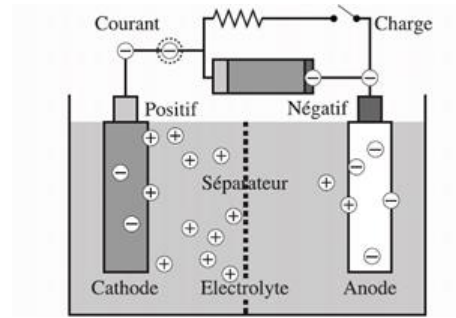
Les accumulateurs présentent un grand intérêt dans les études actuelles de stockage d'énergie électrique, dans la gamme des moyennes puissances et des durées de stockage limitées. Ils présentent le triple avantage : d'exister industriellement, d'être parfaitement modulaires et d'entrer immédiatement en action. Les principaux paramètres qui définissent les performances d'un accumulateur rechargeable sont l'énergie massique ou la quantité d'énergie stockée rapportée à la masse de l'accumulateur, le rendement énergétique qui dépend des vitesses de charge et de décharge. Cette technique de stockage bénéficie du fait que l'énergie électrique et chimique partage le même porteur, l'électron. Ce point commun permet de limiter les pertes dues au passage d'une forme à une autre.

### 5.4.2 Principe de fonctionnement

Une cellule d'accumulateur électrochimique est composée de deux électrodes métalliques une positive et une négative, (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique). Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents (figure (5.8)). Durant la décharge de l'accumulateur, l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction de réduction du couple de plus haut potentiel et l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel. Durant la charge, le phénomène s'inverse : l'électrode positive (anode) s'oxyde et l'électrode négative (cathode) se réduit.

Par convention, on note généralement la réaction chimique d'oxydoréduction dans le sens de la décharge ( $\rightarrow$ ), la flèche inverse étant le sens de la charge ( $\leftarrow$ ). Il existe une multitude de tailles et de formes d'accumulateurs, et une large gamme de matériaux différents peut être utilisée. Les matériaux d'électrode et d'électrolyte les plus connus sont le plomb-acide, le nickel-cadmium (NiCd), le nickel-hydrure métallique (NiMH), le lithium-ion (Li) et le polymère lithium-ion (LiPo).





**Figure (5.8) :** Schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique.

### 5.4.3 Technologies

Il existe diverses technologies d'accumulateurs électrochimiques. Dans les paragraphes suivants est donnée une description des technologies suivantes :

Accumulateurs au plomb

Accumulateurs au nickel (Ni-Cd, Ni-MH, Ni-Zn)

Accumulateurs au lithium (Li-métal, Li-ion, LiP, LiPo)

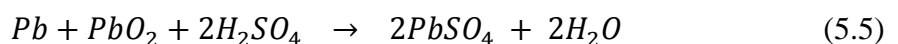
#### a. Accumulateurs au Plomb

L'accumulateur Plomb-acide a été inventé par Gaston Planté en 1859, accumulateurs au plomb, ils représentent encore de nos jours près de 90 % du marché des accumulateurs vendus dans le monde. Peu coûteux, ils restent parfaitement adaptés aux applications stationnaires (sauve- garde centraux téléphoniques et serveurs informatiques, onduleurs, stockage d'énergie provenant de sources renouvelables sur sites isolés...), ainsi qu'à certaines applications embarquées, telles que les batteries de démarrage, les véhicules micro-hybrides et les chariots élévateurs. On distingue différentes technologies d'électrode d'une part (plaques planes ou plaques tubulaires) et d'électrolyte d'autre part (liquide ou gélifié), donnant lieu à une dénomination : batterie ouverte et batterie fermée/étanche.

*Composition électrochimique :*

- ✓ Electrode négative :  $Pb$
- ✓ Electrode positive :  $PbO_2$
- ✓ Electrolyte :  $H_2SO_4$  (l'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique)

*Réaction électrochimique :*



Généralement pour les accumulateurs au plomb, on n'autorise pas une profondeur de décharge supérieure à 80% pour éviter le phénomène de sulfatation de l'accumulateur. En effet, la concentration d'acide sulfurique varie pendant la charge et la décharge. Dans le cas d'une décharge profonde, elle peut être telle que les électrodes sont attaquées, donnant du

sulfate de plomb. On dit alors que l'accumulateur se sulfate. Il devient inutilisable car le phénomène n'est pas réversible.

**Tableau 5.2** : Caractéristiques d'un élément accumulateur plomb-acide.

Tension à vide	2 - 2,1V
Capacité spécifique théorique	120Ah.kg <sup>-1</sup>
Capacité spécifique pratique	7 à 20Ah.kg <sup>-1</sup>
Densité énergétique massique	15 – 40Wh.kg <sup>-1</sup>
Densité énergétique volumique	40 – 100Wh.dm <sup>-3</sup>
Durée de vie	nombre de cycles = 200 – 400 en version étanche, 600 – 1000 en version tubulaire
Températures d'utilisation	de -20°C à +60°C
Rendement faradique global	entre 85 et 90%
Autodécharge	<b>de l'ordre de 0,5% par jour</b>

Ses inconvénients sont les suivants :

- ✓ Une faible densité énergétique massique car sa masse est élevée.
- ✓ Un faible courant de charge.
- ✓ L'utilisation d'un liquide corrosif (pour l'électrolyte).
- ✓ La toxicité due au plomb (recyclage), métal lourd concerné par la directive européenne 2006/66/CE, relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets, interdisant la mise sur le marché de piles ou accumulateurs contenant des substances dangereuses (plomb, cadmium).

#### **b. Accumulateurs au nickel**

##### **✚ Accumulateur nickel-cadmium :**

L'accumulateur Nickel-Cadmium (Ni-Cd) a été découvert par Waldemar Jungner en 1900. Un accumulateur Ni-Cd soumis à un cyclage (charge/décharge) peu profond a tendance à s'adapter aux caractéristiques de ce dernier. S'il est ensuite soumis à une décharge profonde, la tension à ses bornes chute brutalement quand la capacité déchargée atteint la valeur intervenant dans le précédent cyclage. La perte de capacité n'est pas définitive. Une recharge efface cet effet mémoire et autorise les décharges profondes ultérieures. Un accumulateur Ni-Cd présente l'avantage de devoir être déchargé complètement pour rester sur le cycle majeur. On peut donc exploiter complètement l'énergie stockée, en descendant à des faibles niveaux de tensions, contrairement à d'autres accumulateurs pour lesquels une tension minimale est imposée pour des raisons de cyclabilité. En revanche, si l'accumulateur est relié au réseau via un convertisseur, la nécessité de descendre à faible tension impose des contraintes non négligeables au convertisseur

(la faible tension impliquant des forts courants).

Ils sont également utilisés pour des véhicules électriques, mais leurs applications sont limitées par la directive 2006/66/CE qui interdit la mise sur le marché des piles et accumulateurs contenant plus de 0,002% de cadmium en poids.

Les avantages de l'accumulateur Ni-Cd sont :

- ✓ une grande capacité
- ✓ de bonnes performances à faible température
- ✓ un bon niveau de fiabilité
- ✓ une durée de vie élevée et un faible entretien
- ✓ la possibilité de charge complète rapide, de l'ordre de 15min

Ses inconvénients sont les suivants :

- ✓ coût : environ 1,5 fois plus chère que batterie Pb
- ✓ toxicité due au cadmium (recyclage), métal lourd concerné par la directive européenne 2006/66/CE, relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets, interdisant la mise sur le marché de piles ou accumulateurs contenant des substances dangereuses (plomb, cadmium)
- ✓ effet mémoire

 **Accumulateur nickel- métal- hydrure :**

L'accumulateur Nickel Métal Hydrure (Ni-MH) a été développé dans les années 1970 pour répondre au problème du cadmium dans les accumulateurs Ni-Cd, et remplace depuis les années 1990 l'accumulateur Ni-Cd à des niveaux de performances assez comparables. Il s'agit d'une forme dérivée des accumulateurs Ni-H<sub>2</sub>.

**Tableau 5.3 :** Caractéristiques d'un élément accumulateur Ni-MH.

Tension à vide	$E_{0+} + E_{0-} = 1,28V \approx 1,3V$
Capacité spécifique théorique	205Ah.kg-1
Capacité spécifique pratique	45 à 60Ah.kg-1
Densité énergétique massique	60 – 90Wh.kg-1
Densité énergétique volumique	200 – 350Wh.dm-3
Durée de vie	Nombre de cycles = 400 – 700 pour DOD = 100%
Températures d'utilisation	> stockage : de -30°C à +40°C > charge : de 0°C à +40°C > décharge : de -20°C à +50°C
Rendement faradique global	entre 90 et 95%
Autodécharge	de 2% à 4% par jour

*c. Accumulateurs au lithium*

Au début des années 1980, la technologie Ni-Cd est parvenue à maturité, la filière Ni-MH est toujours en développement, et la densité d'énergie limitée des accumulateurs devient un frein au développement des appareils électroniques portables, alors en plein essor. Dans ce contexte, Sony, qui n'a alors qu'une expérience limitée dans le domaine des piles (Zn/Ag<sub>2</sub>O, piles salines et alcalines) mais qui se positionne sur le créneau de l'électronique grand public (caméscopes, baladeurs, téléphones...), initie dans le plus grand secret les travaux qui vont aboutir à la commercialisation des premiers accumulateurs Li-ion, en collaboration avec la firme Asahi Kasei. Tirant parti des travaux de John Banister Goode-nough démontrant la désintercalation réversible du lithium dans l'oxyde lamellaire LiCoO<sub>2</sub> publiés en 1979, et de la démonstration faite par Rachid Yazami et Philippe Touzain en 1983 de la possibilité d'intercaler réversiblement du lithium dans le carbone (graphite), Akira Yoshino associe ces matériaux à un électrolyte liquide adéquat à base de solvants organiques pour réaliser le premier prototype fonctionnel d'accumulateur Li-ion (cette dénomination ne sera donnée que par la suite) en 1983. Il brevète sa découverte en 1985. Sony procède alors au développement de cette nouvelle filière d'accumulateurs dès 1986 et met sur pied un outil industriel de production. En 1991, l'annonce de la mise sur le marché des premiers accumulateurs Li-ion, prend tout le monde de court, et notamment les fabricants d'accumulateurs spécialisés dans le Ni-Cd (SAFT, VARTA et Sanyo essentiellement), bien que certains d'entre eux aient également initié des recherches sur ce sujet.

Pour les accumulateurs au lithium, on distingue quatre technologies selon la constitution de l'électrode négative (lithium métallique ou matériau à insertion de lithium) et la composition de l'électrolyte (liquide ou polymère).

Plusieurs familles d'accumulateurs sont aujourd'hui commercialisées, chacune dans le domaine d'application qui lui revient, en fonction de ses caractéristiques générales (tension, puissance, temps de recharge...). Les accumulateurs à base de lithium font partie des dispositifs électrochimiques les plus récents, expliquant l'intense recherche fondamentale et technologique qui leur est consacrée. On distingue trois technologies différentes pour ces accumulateurs : la technologie Li-métal, la technologie Li-ion et la technologie Li-polymère. Les deux premières catégories diffèrent par la nature de leur électrode négative, à savoir du lithium métallique dans la technologie Li-métal et un matériau d'insertion dans la technologie Li-ion. Bien que de livrant les plus grandes quantités d'énergie (100 à 200 Wh/kg), ces batteries posent d'importants problèmes de sécurité, pouvant aller du simple court-circuit à l'explosion ou la mise à feu de la batterie. Pour éviter les contacts entre électrodes à l'origine de ces problèmes de sécurité, la technologie Li-polymère (Li-Po) utilise un polymère gélifié (séparateur solide) à la place de l'électrolyte liquide utilisé dans les batteries Li-métal ou Li-ion. S'il améliore grandement la

sécurité des batteries, ce procédé est économiquement moins avantageux que la technologie Li-ion et conduit à des performances légèrement inférieures en termes de durée de vie et d'énergie délivrée (80 à 130Wh/kg). C'est donc la technologie Li-ion qui occupe aujourd'hui la plus grande place sur le marché de l'électronique portable. Elle a été commercialisée pour la première fois par Sony Energitech en 1991 et ne cesse d'évoluer depuis lors.

**Tableau 5.3 :** Technologies d'accumulateurs au lithium

Technologie	Li-métal	Li-ion	Li-métal-polymère (LMP)	Li-ion polymère ou plastique
<b>Electrode négative</b>	Lithium métallique	Matériau à insertion de lithium	Lithium métallique	Matériau à insertion de lithium
<b>Electrolyte</b>	Liquide	Liquide	Polymère	Polymère

## 5.5 L'hydrogène comme vecteur d'énergie

L'usage de l'hydrogène commence au début du XVI<sup>e</sup> siècle avec l'alchimiste suisse Paracelse qui étudia les propriétés du Vitriol et de l'acide sulfurique appliqués sur le fer. Il a déclaré qu'il était intrigué par le gaz inodore émergeant de son expérience. Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, le chimiste britannique Henri Cavendish reprend les travaux de Paracelse, conduisant à la découverte de l'inflammabilité de ce gaz par le chimiste suisse Théodore Turquet de Mayerne en 1703, le nommant « air inflammable ». Ce travail fut poursuivi par nombre de chimistes dont le célèbre français Lavoisier. Une communication à l'Académie des sciences fut émise en 1783, lui donnant son nom actuel : Hydrogène, qui signifie « gaz qui produit de l'eau ».

A partir de 1782, l'un des premiers usages de l'Hydrogène fut fait par les frères Montgolfier, l'utilisant comme traction pour les montgolfières. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'hydrogène a pénétré de nombreux secteurs industriels tels que la chimie, la pétrochimie et la fabrication d'engrais. Entre-temps, le gaz a été progressivement utilisé pour l'usage domestique et l'éclairage public en mélange presque moitié-moitié avec du monoxyde de carbone dans un grand nombre de pays. Il a ensuite été remplacé par le gaz naturel. L'hydrogène est depuis de plus en plus utilisé dans divers secteurs industriels pour ses propriétés chimiques et ses performances énergétiques.

### 5.5.1 Stockage d'hydrogène

Il est possible de produire de l'hydrogène en utilisant de l'eau et de l'électricité.

Ensuite il est possible de faire l'opération inverse et de récupérer de l'électricité en transformant l'hydrogène en eau. Cette transformation étant réversible, on peut donc utiliser l'hydrogène pour stocker de l'électricité. Le stockage par la filière hydrogène est un moyen indirect de stocker de l'énergie, au même titre que les moyens de stockage électrochimique ou électromécanique.

**a. Etape 1 : Produire de l'hydrogène par électrolyse en utilisant de l'électricité**

Grace à un électrolyseur, qui utilise beaucoup d'énergie, il est possible de transformer de l'eau en hydrogène. En effet, l'hydrogène appelé également dihydrogène  $H_2$  est un vecteur énergétique.

**b. Etape 2 : le stockage de l'hydrogène**

L'hydrogène est un gaz qui est difficile à stocker car il est tellement petit et léger qu'il se faufile partout et il nécessite d'importants moyens techniques pour le stocker à température basse et à très haute pression. Le prix de stockage et de transport de l'hydrogène est beaucoup plus élevé que celui du gaz de ville ou du diesel. Par exemple, pour faire un trajet de 600km en voiture, il faut un réservoir de 40 kg de gasoil, mais il faut un réservoir de 250 kg d'hydrogène. De plus le réservoir à hydrogène perd entre 1% et 5% de son contenu tous les jours.

**c. Etape 3 : le déstockage de l'hydrogène pour produire de l'électricité**

L'hydrogène ( $H_2$ ) est un gaz qui peut facilement se transformer en eau ( $H_2O$ ) en absorbant une molécule d'oxygène et en produisant de l'électricité. Cette opération est réalisée dans une pile à combustible. On dit que l'hydrogène est décarboné car sa production n'émet pas de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Le système de stockage comprend donc trois composants clés que sont:

- ✓ **Electrolyseur** : L'électrolyseur permet de transformer l'électricité provenant du réseau électrique en dihydrogène par l'électrolyse de l'eau. On distingue deux catégories d'électrolyseur :
  - « solide », autrement dit polymère utilisant une membrane échangeuse de proton (PEM : Proton Exchange Membrane) et une céramique haute température (SO: Solid Oxide).
  - « liquide », électrolyte acide ou basique du type hydroxyde de potassium (KOH)
- ✓ **Le stockage de l'hydrogène** : Le développement de méthodes sûres et efficaces de stockage de l'hydrogène est une condition préalable à l'utilisation de l'hydrogène avec des

piles à combustible. L'hydrogène est un gaz très volatil et occupe un volume important à pression atmosphérique. Pour le stocker, il faut réduire ce volume et donc augmenter la densité. Trois techniques différentes sont utilisées aujourd'hui pour stocker l'hydrogène dans différents états qui sont le gaz à haute pression, l'hydrogène liquide et l'hydrogène solide formé par absorption ou adsorption :

- Le stockage sous pression.
  - Le stockage sous forme liquide.
  - Le stockage sous forme solide.
- ✓ **Pile à combustible** : La pile à combustible (PAC), ou Fuel Cell (FC) en anglais, permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air.

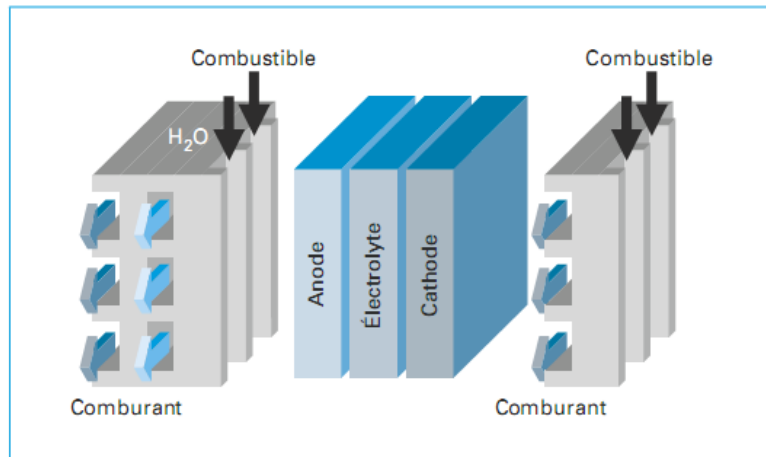
**Principe de fonctionnement** : Il existe un mode de combinaison de l'hydrogène à l'oxygène:



Le dispositif, qui permet cette réaction, est la pile à combustible comportant essentiellement un électrolyte, milieu conducteur ionique acide ou basique, séparant une anode alimentée en hydrogène et une cathode alimentée en oxygène (figure (5.9)). Le principe de la pile à combustible est donc l'inverse de celui de l'électrolyse qui, par le passage d'un courant électrique dans de l'eau, produit de l'hydrogène et de l'oxygène. On distingue plusieurs types de PAC :

- ✓ PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- ✓ SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
- ✓ AFC (Alkaline Fuel Cell) : pile alcaline
- ✓ MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) : pile à carbonate fondu
- ✓ PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) : pile à acide phosphorique

**Remarque** : Les différences notables entre ces différentes piles sont l'électrolyte utilisé, la température de fonctionnement, le dimensionnement et l'application.



**Figure (5.9) :** Schéma simplifié d'une cellule de pile à combustible.

### 5.5.2 Accumulateur à combustible

Si on considère l'ensemble du système (Électrolyseur + stockage + PAC) comme un accumulateur à combustible réversible, les énergies spécifiques données précédemment pour le stockage de l'hydrogène sont à rapporter à l'ensemble de la chaîne énergétique. De plus, le rendement de la chaîne énergétique n'est pas très bon si on prend en considération le rendement d'un électrolyseur et celui d'une pile à combustible, soit de l'ordre de 30 à 40% pour la chaîne complète. Aussi, les coûts d'investissement sont élevés et la durée de vie est limitée, particulièrement pour les applications de forte puissance.

## 5.6 Condensateurs

Les condensateurs sont des composants de stockage électrostatique, direct, considérés comme une source de puissance dans une certaine mesure, compte tenu de leur grande puissance spécifique et leur densité d'énergie relativement faible.

### 5.6.1 Principe de fonctionnement

Un condensateur se compose de deux électrodes, d'un isolant diélectrique entre les deux électrodes et de deux éléments de connexion pour permettre la liaison électrique du composant. Un condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre les deux électrodes séparées par un isolant diélectrique.

#### a. Technologies

On distingue plusieurs familles de condensateurs suivant la nature de l'isolant et des électrodes :

- ✓ Condensateur céramique.
- ✓ Condensateur électrochimique ou électrolytique.
- ✓ Condensateur à film plastique.



### ***b. Applications***

Le stockage de l'énergie est une des applications des condensateurs. Pour le stockage, les condensateurs électrochimiques et films sont privilégiés par rapport aux condensateurs céramiques. Les autres applications de condensateurs sont : accord de circuits oscillants, résonateurs, découplage, liaison, filtrage ou encore compensation en température...

## **5.7 Supercondensateurs**

### **5.7.1 Historique**

D'après, le premier brevet relatif aux supercondensateurs est attribué à Becker (pour la société General Electric) en 1957. L'invention concernait un mode de stockage d'énergie électrostatique reposant sur la double couche électrique développée à l'interface entre un matériau carboné poreux et un électrolyte aqueux (acide sulfurique) dont il était imprégné. En 1969, la société Sohio a déposé un autre brevet concernant un supercondensateur à électrolyte non aqueux permettant des tensions plus élevées. La commercialisation de supercondensateurs n'intervient que dans les années 1970, par les sociétés NEC et Matsushita. Ces composants à électrode en charbon actif et à électrolyte aqueux ou organique sont de faible capacité (quelques Farad) et de faible puissance. Les composants à plus forte puissance et forte énergie spécifique n'apparaissent que dans les années 1990.

### **5.7.2 Définition**

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage de l'électricité constitués de deux électrodes, généralement identiques, séparées par un électrolyte. Comme les accumulateurs, ce sont des systèmes rechargeables, aussi appelés générateurs secondaires, à la différence des piles ou générateurs primaires, qui ne sont pas rechargeables, et des piles à combustible qui transforment directement de l'énergie chimique en énergie électrique.

### **5.7.3 Divers types de supercondensateurs**

Nous distinguerons d'abord deux familles principales :

- ✓ 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.

### 5.7.4 Le principe de fonctionnement

Le principe général de fonctionnement des supercondensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique (figure (5.10)). L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte qui se comportent comme deux condensateurs en série. Le système restitue la charge accumulée avec une excellente efficacité et pendant un très grand nombre de cycles. La réponse électrique des supercondensateurs s'apparente à celle des condensateurs : ils sont capables de délivrer des densités de courant importantes pendant des temps assez courts (forte puissance) ; pour un volume équivalent, ils stockent de 20 à 50 fois moins d'énergie électrique que les accumulateurs, mais environ 100 fois plus que les condensateurs diélectriques usuels, d'où leur appellation de « supercondensateurs » et leur vocation de générateur secondaire.

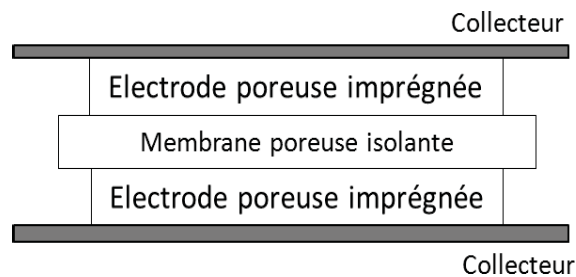


Figure (5.10) : Structure d'un supercondensateur.

### 5.7.5 Applications

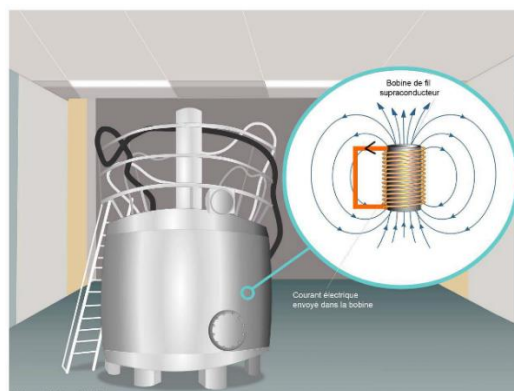
Les supercondensateurs sont utilisés dans diverses applications :

- ✓ Sauvegarde de mémoire dans des systèmes électriques sous faible tension (pallier la défaillance d'un système électrique ou une coupure de courant en supplantant la source déficiente pendant quelques minutes, voire quelques heures).
- ✓ Source de puissance sous tension élevée (compléter un ensemble de sources en assurant un rôle de tampon vis-à-vis des appels de puissance)
- ✓ Stockage dans des dispositifs embarqués ou isolés (stocker l'énergie électrique en mettant en avant la rapidité de recharge ; cependant l'énergie spécifique des supercondensateurs étant faible, cela nécessite des volumes importants de composants).

Les domaines d'application sont donc l'automobile (avec l'avènement des Véhicules Electriques et Hybrides), le transport collectif urbain (aide aux démarrages et récupération de l'énergie au freinage), l'industrie (pour les systèmes de secours, ...), l'électronique domestique (également pour la sauvegarde mémoire) et l'aéronautique.

## 5.8 Stockage à inductance supraconductrice SMES

L'énergie est stockée par l'intermédiaire d'un courant électrique envoyé dans une bobine constituée d'un fil supraconducteur (figure (5.11)). Une fois la bobine court-circuitée (fermée), le courant circule sans perte d'énergie car il n'y a pas de frottement (les électrons circulent en continu). Il y a alors production d'un champ magnétique dans les bobines. L'énergie est donc stockée dans la bobine sous une forme magnétique et électrique, et peut être récupérée dans un très court laps de temps. Les rendements peuvent être très élevés et les principales pertes sont localisées dans les connexions et dans le convertisseur électronique de puissance. Le rendement instantané en puissance peut dépasser les 95%.



**Figure (5.11):** SMES (superconducting magnetic energy storage)

Les avantages et les inconvénient de ce système sont montrées sur le tableau 5.4:

**Tableau 5.4:** les avantages et les inconvénients d'une inductance supraconductrice

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excellent temps de réponse.</li> <li>- Haut rendement.</li> <li>- Adapté pour fournir de l'énergie rapidement.</li> <li>- Durée de vie.</li> <li>- Charge et décharge rapide.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible densité énergétique.</li> <li>- Processus cryogéniques nécessaire (pénalise par conséquent le bilan énergétique)</li> <li>- Autodécharge.</li> <li>- Ondes électromagnétiques.</li> </ul>

## **5.9 Conclusion**

Face au développement rapide des énergies renouvelables intermittentes et non pilotables, le stockage pourrait devenir incontournable pour assurer la continuité de l'alimentation et garantir la qualité de la fourniture en électricité des consommateurs. Batteries électrochimiques, stockage gravitationnel ou stockage d'air comprimé, les technologies se multiplient pour répondre à des besoins très variés et font l'objet de nombreuses initiatives partout dans le monde. Si le stockage d'énergie constitue un levier technique difficilement contournable pour intégrer les moyens de production intermittents et les nouveaux usages, des incertitudes d'ordre technique, réglementaire et surtout économique demeurent.

Afin de parvenir à des modèles économiques acceptables, il faudra renforcer les efforts de RD&D (Research, Development & Deployment) dans la plupart des familles technologiques. Selon les choix politiques et réglementaires de développement du stockage de grande capacité et/ou du stockage diffus émergeront des business modèles multiples et complexes, déclinés pour chaque acteur du marché. Créée en 2011, l'European Association for Storage of Energy (EASE), association européenne regroupant des industriels, des universitaires, des organismes européens permettra de poursuivre et d'enrichir les réflexions sur ces sujets à l'échelon européen.

## Bibliographie

- [1] Wind Europe, "Wind in Power-2016 European Statistics", Wind Europe Business Intelligence 2017.
- [2] UCTE (Union pour la coordination du transport d'électricité en Europe): <http://www.ucte.org/>.
- [3] Center, E. T. (2013). The history of electrification: the birth of our power grid.
- [4] voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 25(3), 836-843.
- [5] European Commission, "Energy roadmap 2050," [Online], Available
- [6] U.S. Department of Energy., "Smart Grid / Department of Energy."
- [7] Update, A. M. (2017). Global wind report. Global Wind Energy Council.
- [8] Burger, B. (2017). Fraunhofer institute for solar energy systems ISE.
- [9] Le ministère de l'énergie, Conception et réalisation SATINFO, Société du Groupe Sonelgaz. (2016). Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie. <http://cemagas.org>.
- [10] <https://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/solaires-directes.html>
- [11] Mostefa, A. (2021). *Contribution à la Modélisation et la Commande d'un Système Multi Source Connecté au Micro- Réseau* (Doctoral dissertation, USTO, faculté de génie électrique).
- [12] Merabet Boulouiha, H. (2013). *Contribution à l'étude et la commande d'une éolienne pour la production de l'énergie électrique* (Doctoral dissertation, USTO, faculté de génie électrique).
- [13] [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/IF%20Energie%20ER12%20Part%20FR](https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF%20Energie%20ER12%20Part%20FR)
- [14] [https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/17654/Parenteau\\_William\\_MEnv\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/17654/Parenteau_William_MEnv_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [15] <https://www.la-biomasse.com/>
- [16] <https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>
- [17] Mambrini, T. (2014). *Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies* (Doctoral dissertation, Paris 11).
- [18] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/>