

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Ferhat ABBAS Sétif1



**FACULTE DES SCIENCES
TC SM
Unité : Découvertes 2**

Polycopié de cours

Energies renouvelables

Réalisé par : Dr. *HADDADI Khelifa*

2019/2020

Sommaire

Cours 1	<i>Energies renouvelables.....</i>	1
Cours 2	<i>Energie solaire photovoltaïque.....</i>	4
Cours 3	<i>Energie solaire thermique (Photo-thermique).....</i>	7
Cours 4	<i>Energie éolienne.....</i>	10
Cours 5	<i>Energie biomasse.....</i>	15
Cours 6	<i>Energie géothermique</i>	19
Cours 7	<i>Pile à combustible</i>	21

Cours 1 : Energies renouvelables

Définition

L'énergie en physique

En physique, l'**énergie** est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur. Dans le Système international d'unités (SI), l'énergie s'exprime en joule.

Les énergies renouvelables (EnR en abrégé) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par le Soleil (la chaleur, la lumière), la lune (marées), la Terre (géothermie), les déchets... Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle.

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Histoire de l'énergie (énergies non renouvelables)

Il existe deux familles d'énergie non renouvelable :

Les énergies fossiles

Elles sont tirées principalement du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Elles sont appelées fossiles car elles proviennent de la décomposition très lente d'éléments organiques (provenant de la décomposition d'animaux ou de plantes) il y a plusieurs millions d'années.

Leur quantité est limitée sur Terre et leur extraction qui est rapide provoque leur épuisement. Il est plus ou moins facile d'extraire cette énergie, en fonction des conditions géologiques et de l'évolution des techniques.

Les énergies fossiles sont à base de carbone, elles produisent du dioxyde de carbone (CO₂), lors de leur combustion, qui est une des causes du réchauffement climatique.

L'énergie nucléaire

Cette énergie provient essentiellement des interactions nucléaires (désintégration, fission...). Son utilisation ne produit pas de CO₂. Par contre elle produit des déchets

radioactifs difficiles à recycler et à stocker et dont la durée de vie peut être très longue (plusieurs milliers d'années). Par ailleurs le rendement des centrales étant relativement faible, elles nécessitent beaucoup d'eau pour être maintenues en fonctionnement ce qui a pour effet de réchauffer le cours d'eau utilisé avec des effets sur la faune et la flore.

Grandeurs physiques et thermodynamique

Transfert thermique, appelé plus communément **chaleur** est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. On distingue trois types de transfert thermique, qui peuvent coexister :

- **La conduction**, due à la diffusion progressive de l'agitation thermique dans la matière ;
- **La convection**, transfert thermique qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière ;
- **Le rayonnement**, qui correspond à la propagation de photons.

Quantité de chaleur Q

C'est la quantité d'énergie échangée par ces trois types de transferts, elle s'exprime en joule. Par convention, $Q > 0$ si le système reçoit de l'énergie. La thermodynamique s'appuie sur le concept de chaleur pour ériger le premier et le deuxième principe de la thermodynamique.

La signification du mot chaleur dans le langage courant entretient souvent des ambiguïtés et des confusions, notamment avec la température. Les transferts thermiques spontanés se font depuis les régions de température plus élevée vers les régions de température plus basse. Il est néanmoins possible de réaliser un transfert thermique d'un corps froid vers un corps chaud, à l'aide d'une machine thermique comme un réfrigérateur. Par ailleurs, lors d'un changement d'état, un corps pur ne change pas de température alors qu'il échange de l'énergie sous forme de chaleur.

Température

Origine physique

Les particules qui composent la matière (molécules ou atomes) ne sont jamais au repos. Elles sont en vibration permanente et possèdent donc une certaine énergie cinétique. La température est une mesure indirecte du degré d'agitation microscopique des particules. Par ailleurs, un espace vide de matière mais dans lequel de la lumière se propage contient lui aussi de l'énergie. On peut associer une température à ce rayonnement qui mesure l'énergie moyenne des particules qui le constituent.

Un exemple important de rayonnement thermique est celui du *corps noir* dont un exemple est donné par les étoiles dont le rayonnement révèle la température des atomes qui sont à sa surface.

L'unité légale de température dans le Système international est le **kelvin** de symbole **K**.

Energie interne

$$\Delta U = W + Q$$

Energie libre

$$F = U - TS$$

Enthalpie

$$H = U + PV$$

Enthalpie libre

$$G = H - TS$$

Grandeurs

W : travail

Q : chaleur

P : pression

V : volume

T : température

S : entropie

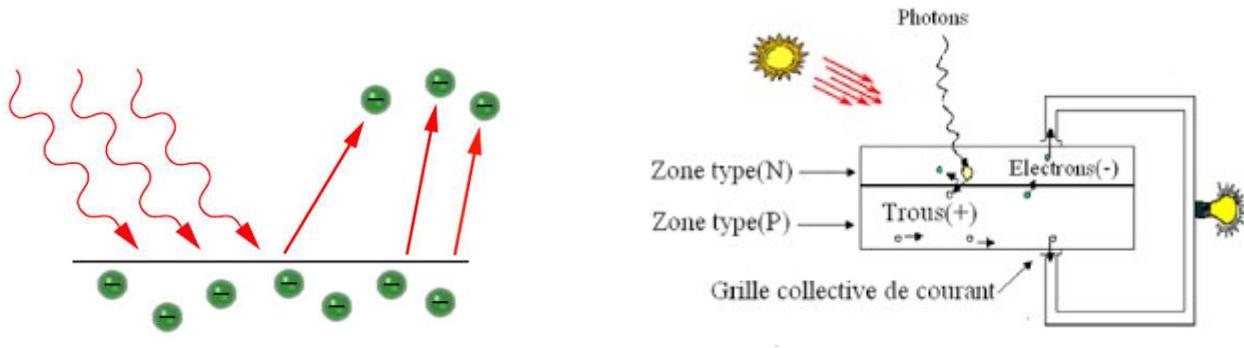
Cours 2 : Energie solaire photovoltaïque

Interaction matière-lumière

1) L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Il a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel et présenté à l'académie des sciences en 1839.

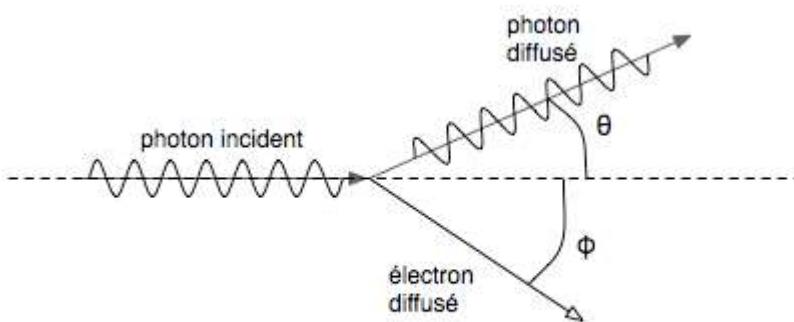
Le dispositif qui met en œuvre ce phénomène comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons (cathode) et l'autre un déficit en électrons (anode), dites respectivement dopée de type n et dopée de type p et qui constituent une cellule photovoltaïque.



Effet photovoltaïque

2) L'effet Compton

En physique, l'effet Compton (aussi appelée la *diffusion Compton*) est une diffusion inélastique reposant sur la conservation de l'énergie cinétique globale du système étudié. Ce phénomène est observé lorsqu'un photon incident entre en collision avec un électron libre (ou faiblement lié) d'un atome. Au cours de ce processus, l'électron est éjecté de l'atome, qui est donc ionisé tandis qu'un photon est diffusé. Arthur Compton a, en 1923, observé l'allongement de la longueur d'onde du photon dans cette diffusion, effet auquel on a attribué son nom : *l'effet Compton*.



Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie **électrique** produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base du système. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir en électricité les ondes électromagnétiques (rayonnements) émises par le Soleil.

Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et de transport électrique.

Modules photovoltaïques

L'élément de base est la cellule photovoltaïque et le produit commercial s'appelle un module photovoltaïque. Il existe plusieurs techniques de modules solaires photovoltaïques :

- 1) **Les modules solaires monocristallins** possèdent le meilleur rendement au mètre carré et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints.
- 2) **Les modules solaires polycristallins** ont actuellement le meilleur rapport qualité/prix, c'est pourquoi ce sont les plus utilisés. Ils ont un bon rendement et une bonne durée de vie (plus de 35 ans) ;

3) Les modules solaires amorphes ont aussi des atouts car ils peuvent être souples et ont une meilleure production par faible lumière. Cependant, le silicium amorphe possède un rendement divisé par deux par rapport à celui du cristallin, cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

Le rendement des panneaux solaires photovoltaïques

Le taux de rendement photovoltaïque indique le rapport entre la production produite et la puissance du rayonnement captée par les panneaux solaires. Ce taux de rendement est exprimé en pourcentage. Le rendement des panneaux solaires photovoltaïques varie en fonction de plusieurs facteurs entre 6 et 20%. Il dépend du lieu d'installation, de l'inclinaison des panneaux, de leurs orientations et de leur température.

Unités de mesure

Quelle est la différence entre Watt / Watt-crête / Watt heure ?

Watt, c'est l'unité de mesure internationale de la puissance énergétique. Elle correspond au débit de production ou de consommation de l'énergie.

1 Kilowatt = 1000 Watts (W)

Watt heure, c'est la quantité d'électricité produite sur une période d'une heure. Le Wh est l'unité de référence qui correspond à la consommation d'un appareil électrique de mille Watts pendant une heure.

Watt crête, c'est l'unité de mesure d'un module solaire. On l'écrit : Watt-crête (Wc) ou kilowatt crête (kWc)

Cours 3 : Energie solaire thermique (Photo-thermique)

I. Définitions

- **Energie thermique :**

La chaleur est la forme d'énergie la plus commune. Elle consiste en un mouvement désordonné de molécules et d'atomes, appelé agitation thermique. Elle est omniprésente dans les transformations d'énergie, dont elle constitue souvent un déchet inutilisable.

- **L'énergie solaire thermique**

Est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

II. Principes physiques

1) L'absorption

L'absorption en optique, ou en électromagnétisme, désigne un processus physique par lequel l'énergie électromagnétique est transformée en une autre forme d'énergie.

Pour les photons (quanta de lumière), l'absorption représente le phénomène par lequel l'énergie d'un photon ($E = hv$: Relation de Planck-Einstein) est prise par un atome pour passer à un état excité via une transition électronique (L'électron passe d'un état énergétique fondamental vers un état excité).

L'énergie électronique peut être transformée sous les formes suivantes:

- Énergie électromagnétique par l'émission de photon(s) (lumière),
- Transformée en agitation particulaire (augmentation de la vitesse de la particule) ce qui se traduit au niveau macroscopique par une augmentation de la température (l'énergie électromagnétique a été transformée en chaleur),
- En phonon (agitation du réseau cristallin dans un cristal),
- En plasmon (oscillation collective d'électron dans un métal).

2) La conduction thermique

La conduction thermique (ou diffusion thermique) est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de la matière (à l'échelle macroscopique). Elle peut s'interpréter comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique : un atome (ou une molécule) cède une partie de son énergie cinétique à l'atome voisin.

N.B : la convection est une autre forme de transfert thermique

III. Capteurs solaires thermiques

Un capteur solaire thermique (collecteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

Il existe plusieurs types de capteurs :

- **Les capteurs plans** qui peuvent fournir une eau entre 50 °C et 80 °C ;
- **Les capteurs à tubes sous vide** assurant une isolation limitant les déperditions par rayonnement et par convection. Ces capteurs sont particulièrement adaptés à la production d'eau chaude sanitaire car ils peuvent fournir une eau jusqu'à 85 °C. Certains capteurs, utilisés pour des applications industrielles, ont une température de chauffe qui peut dépasser les 100 °C ;
- **Les capteurs à concentration** qui peuvent produire une eau jusqu'à 120 °C, également utilisés pour les applications industrielles.

Energie solaire thermique haute température

Elle est basée sur le principe de la concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage qui permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 C et 1 000 C.

1) Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.

2) Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.

Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporeur situé au foyer du capteur solaire.

Cours 4 : Energie éolienne

Historique

Ce sont les pécheurs qui furent les premiers à utiliser l'énergie de vent afin de déplacer leurs embarcations sur les mers. Au V^{ème} siècle Av JC, les Perses se servaient des éoliennes pour irriguer leurs champs (roues à aube). Il faut attendre le VII^{ème} siècle pour voir apparaître des moulins à vent pour moudre le blé. La production d'électricité à partir d'éoliennes est apparue dans le milieu des années 1970 suite au premier choc pétrolier. Ce type d'éolienne est appelé **aérogénérateur**.

Définition de l'énergie éolienne

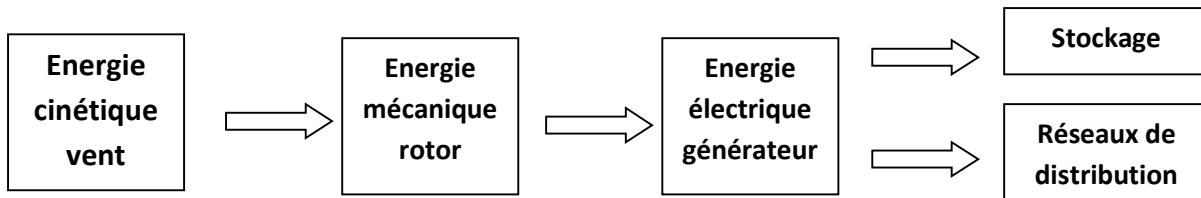
L'énergie éolienne est celle tirée du vent. Elle est produite au moyen d'un dispositif appelé aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

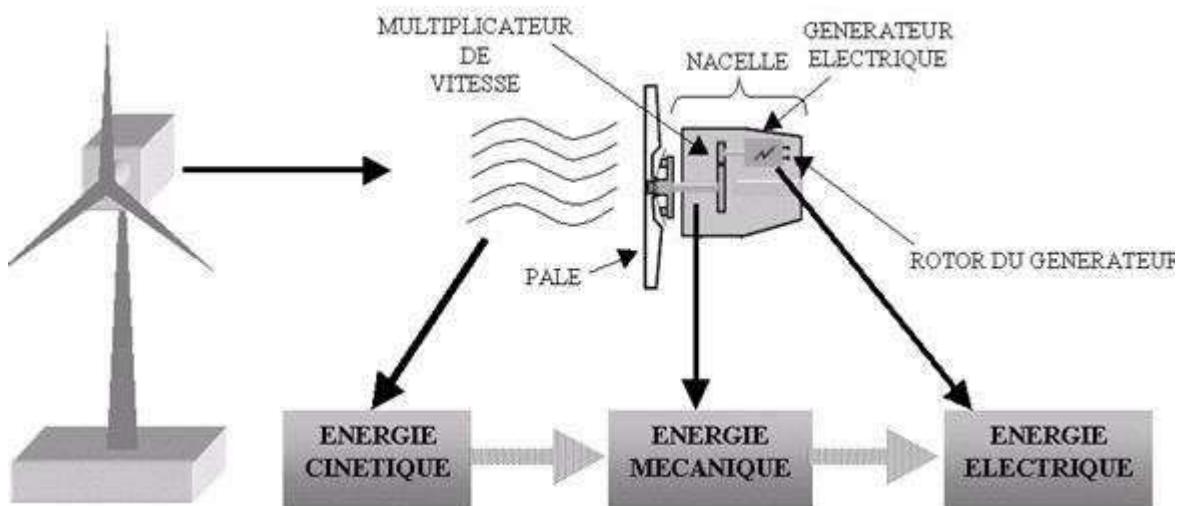
La conservation de l'énergie mécanique où le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

La transformation en énergie électrique : l'éolienne est couplée à un onduleur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Il est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint ou une batterie.

Principe physique

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. Les composantes d'un aérogénérateur.





Les différents types d'aérogénérateurs

Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont les premières structures développées pour produire de l'électricité en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Les Eoliennes à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées. Les différentes Constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales. Ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance.

Eolienne à vitesse constante (FIX)

Sont souvent munies d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Avantages :

- Système électrique simple-Grand fiabilité
- Non nécessité de systèmes électrique de commande

Inconvénients :

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur

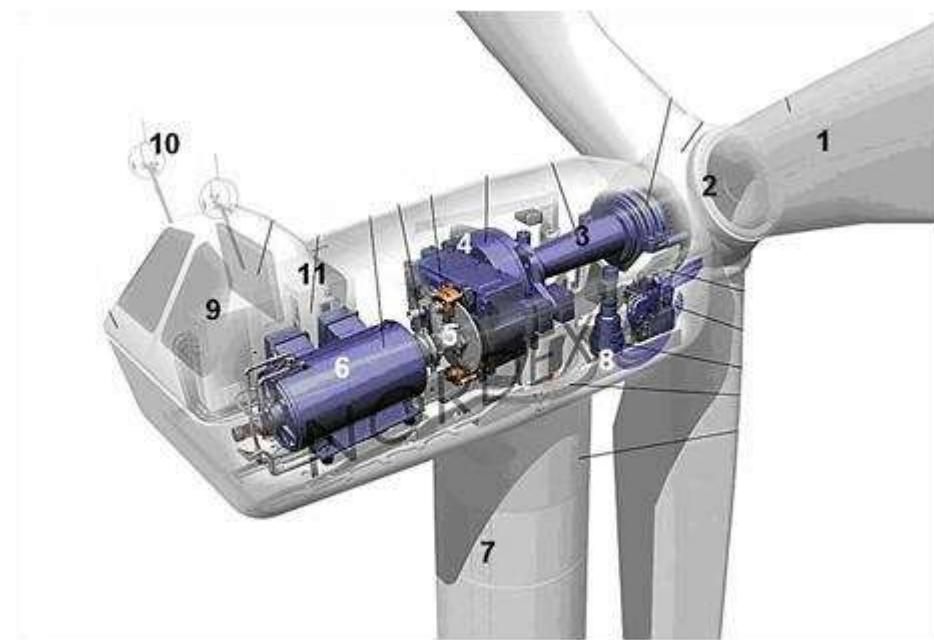
Eoliennes à vitesse variable

Sont souvent moins coûteuse car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (la fibre de carbone

Avantage :

- Une meilleure extraction de l'énergie du vent
- Augmentation du rendement énergétique
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.
 - L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient.

Les composantes de l'aérogénérateur



1. **Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes.
2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation
3. **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente.
8. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse.

11. Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

Cours 5 : Energie biomasse

I. Définition

La biomasse est la matière organique d'origine végétale, animale ou fongique (champignons) utilisée comme source d'énergie.

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.

L'énergie biomasse n'est renouvelable et durable qu'à certaines conditions :

- pas de surexploitation de la ressource ;
- pas de mise en péril de la fertilité des milieux qui la produisent (sol, zones humides, océans) ;
- pas d'impacts excessifs sur la biodiversité ;
- pas d'émissions de gaz à effet de serre ou destructrices de la couche d'ozone qui ne soient compensées.

II. Transformation de la biomasse en énergie

1) Transformation par combustion

Brûler une bûche constitue la plus ancienne méthode de valorisation énergétique de la biomasse. La combustion de biomasse solide (tels les résidus de bois) génère de l'énergie thermique. Celle-ci peut être utilisée comme tel pour alimenter par exemple un réseau de chaleur ou être transformée en électricité (par l'intermédiaire d'une turbine vapeur), voire les deux (grâce à un moteur à cogénération). La combustion de granulés de bois (ou pellets) constitue une alternative de chauffage économique et écologique en comparaison aux énergies fossiles polluantes, que ce soit à l'échelle d'un ménage ou d'une industrie. Les appareils de chauffage proposés sur le marché deviennent, quant à eux, de plus en plus performants en termes de rendement et d'émissions.

2) Transformation par gazéification

La gazéification des matières organiques solides (résidus de bois) est un procédé thermochimique qui transforme la biomasse en un gaz de synthèse combustible, appelé syngas (un mélange de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H₂)). Il s'agit d'un procédé à la frontière entre la prolyse (décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de sa température pour obtenir d'autres produits : (gaz et matière) qu'il ne contenait pas.) et la combustion en l'absence d'oxygène, lors duquel le carbone plutôt que de se combiner avec l'oxygène pour former du CO₂, va prendre de l'hydrogène ou une partie de l'oxygène qui traîne et produire du monoxyde de carbone (CO). Cette transformation est considérée comme l'une des voies possibles pour produire des biocarburants de deuxième génération, la voie BTL (*Biomass To Liquid*). Le gaz est brûlé dans un moteur pour la production de l'énergie mécanique, de l'électricité ou de la chaleur.

3) Transformation par méthanisation

Le procédé de méthanisation est destiné à une biomasse généralement plus humide, du type résidus agricoles, déchets de l'industrie (ex : agroalimentaire) ou effluents ménagers.

Il consiste en la digestion des matières organiques en l'absence d'oxygène sous l'action combinée de microorganismes (fermentation). La méthanisation des matières organiques fermentescibles permet de produire du **biogaz**. Il peut ensuite être transformé en électricité et/ou en chaleur ou en biocarburant destiné au transport. Certaines installations de production du biogaz valorisent également les plantes et cultures dédiées à des fins énergétiques.

III. Les biocarburants

1) Les biocarburants de première génération

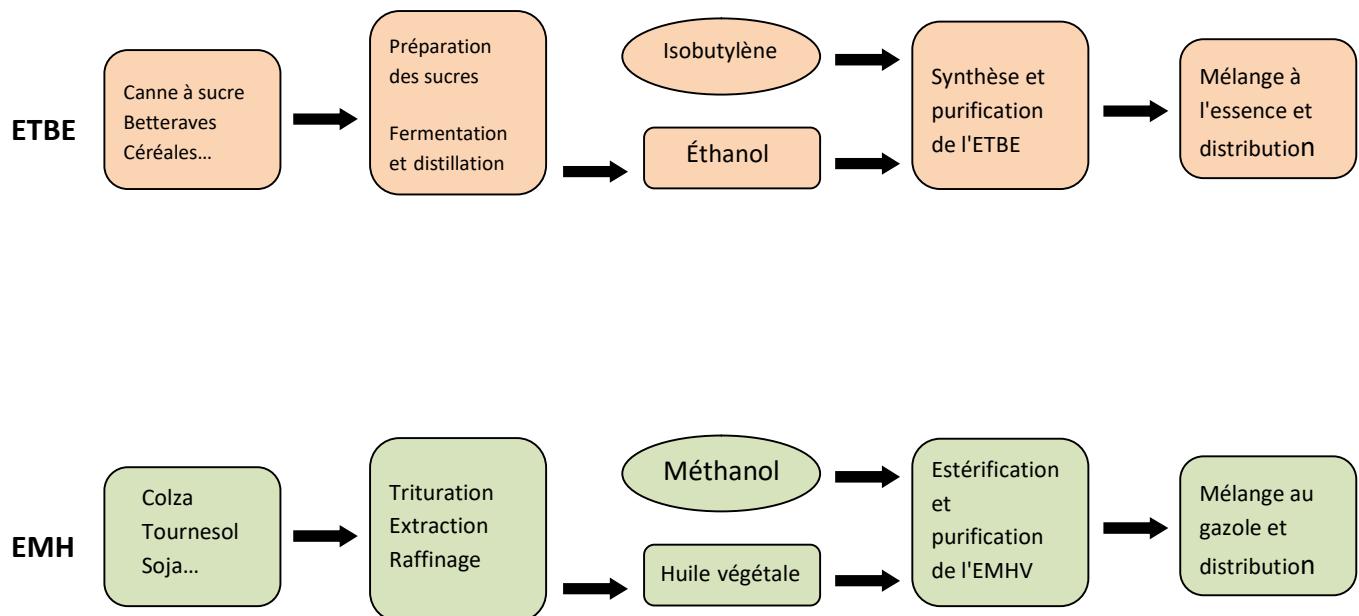
Il existe actuellement deux grandes filières de production de biocarburants : la filière éthanol, utilisé en direct ou transformé en ETBE (éthyl tertio butyl éther) pour les véhicules essence et la filière des huiles végétales, transformées en esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) pour les véhicules diesel.

a) Le bioéthanol : provient de la fermentation de sucres issus de céréales ou de plantes sucrières. L'utilisation d'un mélange riche en éthanol comme le E85 (85 % d'éthanol, 15 %

d'essence) est pratiquée en plusieurs pays. Le moteur du véhicule nécessite alors des adaptations spécifiques (technologie dite Flexible Fuel).

b) L'ETBE : est obtenu par synthèse à partir de bioéthanol et d'isobutylène. Il peut être utilisé en mélange avec de l'essence dans une proportion allant jusqu'à 15 %, sans poser de problème de sécurité ni de logistique.

c) L'EMHV ou biodiesel est un ester obtenu par réaction du méthanol avec une huile végétale. Il peut être utilisé pur dans des véhicules adaptés ou mélangé au gazole à hauteur de 5 %. Il est produit essentiellement à partir de colza (une huile végétale que l'on obtient par trituration de graines de colza.) et, dans une moindre mesure, de tournesol. Il peut être fabriqué à partir d'autres végétaux tels que la palme ou le soja, ou encore à partir de graisses animales. Au niveau mondial, l'éthanol est le biocarburant dont l'usage est le plus répandu.



2) Les biocarburants de deuxième génération

Il s'agit du biométhane (biogaz épuré), principalement issu de résidus et de déchets, ainsi que de cultures spécifiques.

Les autres biocarburants de 2ème génération sont produits par pyrolyse ou gazéification à partir de matières lignocellulosiques et non alimentaires.

3) Les biocarburants de troisième génération

Les biocarburants de 3ème génération qui sont encore au stade de recherche et qui visent à exploiter la biomasse algale par le procédé de bioconversion (modification génétique des algues).

Cours 6 : Energie géothermique

I. Définition

La **géothermie**, du grec géo (la Terre) et thermos (la chaleur), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

La terre est subdivisée, du point de vue des ressources géothermiques, en deux types de régions :

1. Les zones géodynamiques actives, généralement des « frontières de plaques », dans lesquelles une quantité très importante d'énergie est dissipée depuis les profondeurs vers la surface, produisant le mouvement des plaques et des phénomènes sismiques et volcaniques. L'énergie y est principalement dissipée par convection ;
2. Les zones continentales stables, dans lesquelles l'énergie est dissipée par conduction à travers les formations géologiques, en produisant un gradient géothermique (augmentation de la température avec la profondeur) de 3°C tous les 100 mètres en moyenne.

II. Types de l'énergie géothermique

- 1) **La géothermie à basse enthalpie (température)** : exploite la chaleur de gisements d'eau situés à des profondeurs de quelques centaines de mètres jusqu'à environ 2000 m, pour des températures généralement comprises entre 30°C et 90°C.
- 2) **La géothermie à haute enthalpie (température)** : concerne les fluides dont les températures sont supérieures à 150 °C. Ceux-ci sont mis en production par forages généralement à plus de 1500 mètres de profondeur.

Avec le développement des approches, on distingue les sous types, à haute enthalpie, suivants :

- **géothermie des roches chaudes sèches** (*Hot Dry Rock* ou *HDR*), basée sur la fracturation hydraulique et la création d'un « échangeur thermique profond » qu'il faut périodiquement décolmater ;
- **géothermie des roches naturellement fracturées** : (*Hot Fractured Rock* ou *HFR*) ;
- **géothermie stimulée** EGS (*Enhanced Geothermal System* ou *EGS*) ;
- **la géothermie très profonde** à très haute température.

N.B : ce dernier type est utilisé dans la production de l'électricité

III. Avantages de l'énergie géothermique

- Énergie renouvelable Énergie ;
- constante (24h/24) ;
- Indépendante de la météo ;
- Pas d'émission de CO2 ;
- Installation de longue durée (40-60 ans) ;
- Peu d'impact sur la nature ;

IV. Inconvénients de l'énergie géothermique

- Pas possible partout
- Si peu profonde : (Utilisation locale, Peu de production électrique)
- Si profonde : (Risque lié aux forages, Rendement électrique faible (5-15%))

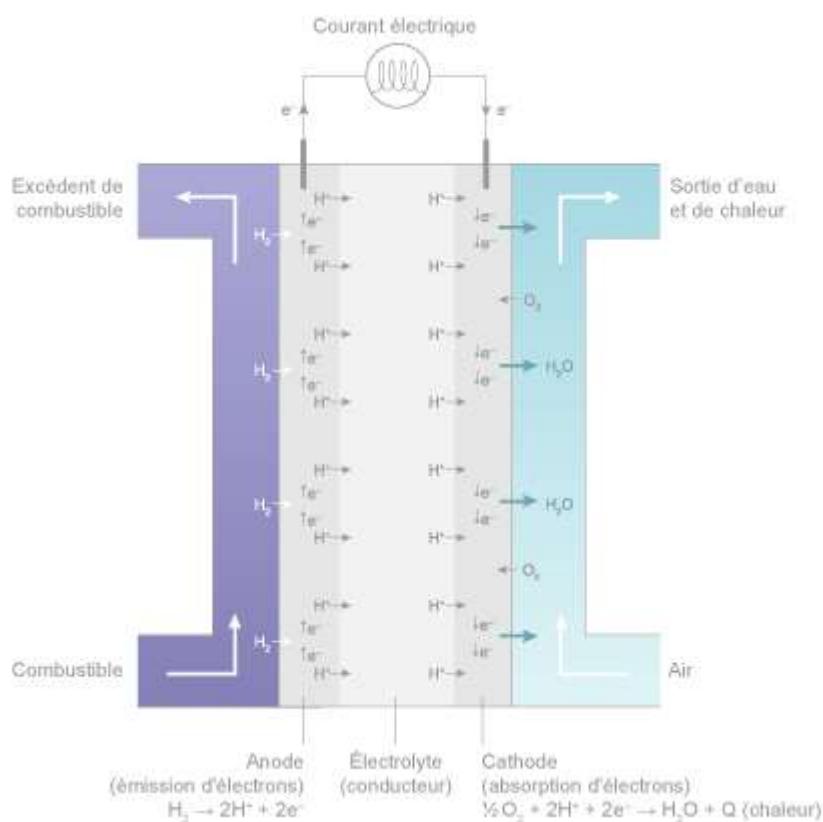
Cours 7 : Pile à combustible

I. Définition

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.



Fonctionnement d'une pile à combustible

II. L'alimentation d'une PAC

Elle se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ».

Les piles à combustible se différencient d'abord par la nature de leur électrolyte, soit acide conduisant les ions positifs (protons H^+) de l'anode à la cathode, soit basique (anions OH^- , O^{2-} , CO_3^{2-}) en sens contraire.

III. Types de piles à combustible

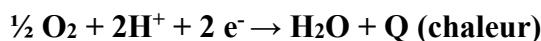
1) Piles à électrolytes acides : ions H^+ migrant de l'anode vers la cathode.

Principe chimique

À l'anode : oxydation catalytique, en présence de platine, de l'hydrogène qui se dissocie de ses électrons :



À la cathode : réduction catalytique, en présence de platine, de l'oxygène capture les ions H^+ qui ont traversé la membrane électrolyte et les électrons arrivant du circuit extérieur. La réaction produit de la chaleur et de l'eau :



Les types :

- **Les PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température. (20-100°C). Celle-ci transmet sélectivement vers la cathode les ions H^+ formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode ;
- **Les DMFC** (Direct Methanol Fuel Cell). Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol (CH_3OH). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau. Son oxydation catalytique produit des ions H^+ et du gaz carbonique. Comme sur

les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les H^+ vers la cathode ;

- **Les PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell) utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C.

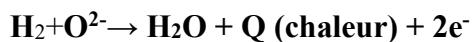
2) Piles à électrolytes basiques : ions négatifs migrant de la cathode vers l'anode.

Principe chimique

À la cathode : réduction catalytique de l'oxygène :



À l'anode : oxydation catalytique de l'hydrogène qui capture les ions O^{2-} qui ont traversé l'électrolyte pour donner de la chaleur et de l'eau :



Les types

- **Les AFC** à potasse liquide (Alkaline Fuel Cell) utilisent l'ion OH^- libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode ;
- **Les MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell) utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions CO_3^{2-} ;
- **Les SOFC** (Solid Oxyde Fuel Cell) exploitent un électrolyte solide (zircone dopé aux terres rares) pour produire des ions O^{2-} .