

Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Technologie



Polycopié

Energies Renouvelables

- Cours -

- L3 Génie mécanique / Energétique
- L3 Automatique

Dr. ABDEREZZAK Bilal
Maitre de conférences classe B

Janvier 2017

Préface

L'enseignement des bases des énergies renouvelables est devenu une nécessité dès le début de carrière d'un étudiant universitaire dans le domaine de « la science et de la technologie ». Ces énergies non polluantes contribuent à un environnement plus protégé vis-à-vis des émissions dangereuses, que ce soit celles dites à effet de serre ou celles qui dérangent la qualité de l'air.

Le présent polycopié de cours que je présente, dans le cadre de mon habilitation universitaire, est destiné essentiellement aux étudiants du Génie Mécanique et de l'Energétique. D'autre spécialité s'intéressant à ce cours peuvent s'ajouter telle que le génie électrique par sa filière Automatique.

Le but de ce cours est d'offrir un large aperçu sur les différentes sortes d'énergies renouvelables (sources et technologies).

Ce polycopié de cours est composé de sept (07) chapitres repartis comme suit :

Le premier chapitre regroupe l'énergie solaire par ces trois grands axes : (i) le solaire thermique, (ii) le solaire photovoltaïque, (iii) le solaire mécanique. Il définit les principes de fonctionnement de chaque type ainsi que des exemples d'applications.

Le deuxième chapitre fait découvrir à l'étudiant le monde des éoliennes en passant toujours par le principe de fonctionnement et quelques éléments de calculs. La description complète des éléments de la nacelle et du rotor de l'aérogénérateur est présentée. Plusieurs impacts de l'utilisation des éoliennes sont aussi introduits dans ce chapitre.

L'énergie hydraulique et l'énergie marine sont traitées respectivement dans les chapitres 3 et 4.

La géothermie aura sa place dans ce polycopié au chapitre 5, plusieurs applications domestiques et industrielles y sont présentées.

Les biocarburants et le biogaz feront l'objet du sixième chapitre qui concerne la biomasse.

Un aperçu sur un vecteur énergétique important qui est l'hydrogène est donné au chapitre 7, avec quelques précisions sur les piles à combustible. un résumé des modes de stockage d'énergie est aussi employé dans ce dernier chapitre.

Des évaluations formatives du cours sont présentées à la fin de ce polycopié sous forme de Questions à Choix Multiples (QCM).

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 : L'énergie solaire.....2

- Le solaire thermique
- Le solaire photovoltaïque
- Le solaire mécanique

Chapitre 2 : L'énergie éolienne.....11

Chapitre 3 : L'énergie hydraulique19

Chapitre 4 : L'énergie marine.....26

Chapitre 5 : La géothermie.....34

Chapitre 6 : La biomasse.....38

- Les biocarburants
- Le biogaz

Chapitre 7 : L'hydrogène et le stockage de l'énergie.....41

Références bibliographiques49

Evaluations formatives50

Introduction Générale

Dans le contexte politique mondial actuel de lutte contre la pollution et le réchauffement climatique, il semble nécessaire de développer des énergies alternatives aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables sont, de nos jours, souvent perçues comme des énergies écologiques non productrices de CO₂, ce qui constitue l'attrait majeur de celles-ci.

On définira une **énergie renouvelable** comme une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. Elles sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants. Souvent, provoqués par les astres et principalement le Soleil (rayonnement, cycle d'évaporation...), il en existe différents types que nous traiterons par la suite : les énergies solaires, éoliennes, hydrauliques, marines ou issus de la géothermie et de la biomasse.

En ces termes, le pétrole, le gaz naturel et le charbon ne sont pas des énergies renouvelables car il faudra des millions d'années pour reconstituer les stocks d'énergie fossile que l'on consomme actuellement. De même, l'énergie nucléaire actuelle, issue de la fission des atomes d'uranium, ne peut pas être considérée comme une énergie renouvelable, la réserve d'uranium disponible sur Terre étant limitée.

En opposition à cela, le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles renouvelables capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes.

Cependant, il est important de s'intéresser aux diverses technologies de production pour comprendre leur intérêt sur différents plans : écologique, économique, politique et géopolitique.

Chapitre 1
L'énergie Solaire

Introduction

Le soleil "rayonne" à la Terre chaque année 40 000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergie fossile. Il existe 3 utilisations de l'énergie solaire

- La production de chaleur : le "solaire thermique"
- La production d'électricité : le "solaire photovoltaïque"
- La production d'un mouvement : le "solaire mécanique"

De nombreuses recherches sont en cours dans ces 3 domaines, essentiellement pour le photovoltaïque. En effet, le rendement des cellules photovoltaïques étant assez faible, de l'ordre de 20% maximum pour les utilisations militaires et de 10 à 15% (grand maximum) pour les utilisations civiles, la porte reste ouverte à de nombreuses améliorations. Le solaire thermique est plus commun que le photovoltaïque, les tarifs et donc la rentabilité du photovoltaïque étant si faibles (sans parler des problèmes de stockage de l'énergie) qu'il se limite généralement aux sites isolés. Un système énergétique solaire est donc mis en place en un lieu donné pour fournir de l'énergie sous une forme ou une autre, (mécanique, thermique et électrique). D'une façon générale sa structure est peut être schématisée de la façon suivante :

Une entrée :

- Le gisement solaire local ;
- L'environnement géographique ;
- Le ou les sources énergétiques d'appoint.

Un transfert

- Dispositif de captation du rayonnement solaire avec ou sans concentration ;
- Élément de conversion d'énergie d'une forme à une autre ;
- Des organes de pilotage et de régulation.

Un stockage :

- Dispositifs tels que : des réservoirs d'eau, des masses calorifiques à chaleur sensible ou latente, des batteries électriques...etc.

Exemples d'applications:

- Fourniture d'eau chaude ou d'air chaud (chauffage des locaux)
- Pompes à eau
- Centrale électrique
- Séchage des produits agro alimentaires
- Dessalement de l'eau

1. Le solaire thermique

Le solaire thermique récupère la chaleur du soleil grâce à un fluide qui circule dans les capteurs.

1.1.Principe de fonctionnement

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à un circuit d'eau secondaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur. Par la suite ce circuit alimente un circuit secondaire qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

La circulation de l'eau peut se faire par simple phénomène physique, l'eau chaude est moins dense que l'eau froide. C'est pour cela que sur le schéma l'eau chaude est toujours au dessus de l'eau froide, voir figure 1.

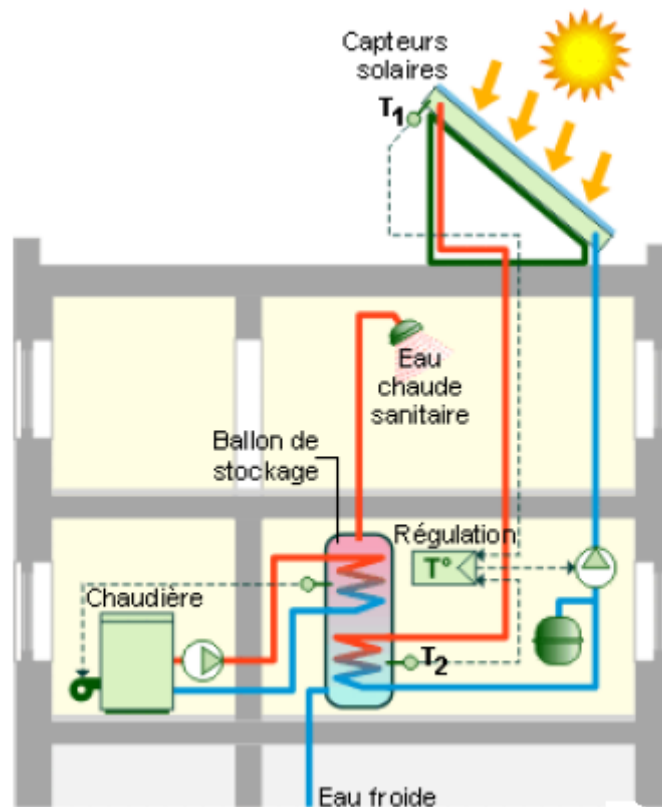


Figure 1 : Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire

Les composants du chauffe eau solaire de la figure 1, ainsi que du système intégré dans le bâtiment sont les suivants:

- Le capteur solaire qui servira à la transformation du rayonnement solaire en chaleur ;
- Le réservoir de stockage de la chaleur jusqu'au moment de l'utilisation ;
- La boucle primaire qui aura pour objectif le transfert de chaleur entre le capteur et le réservoir ;

- Système de régulation du transfert de chaleur vers le réservoir (s'arrête quand $T_{\text{réservoir}} > T_{\text{capteur}}$) ;
- La chaudière servira comme une énergie d'appoint lorsqu'il n'y aura pas assez de soleil.

1.2. Les avantages

- Rendement élevé (jusqu'à 80%) ;
- permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement, ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient maîtriser leurs dépenses telles que les piscines très énergivores ;
- Source d'énergie inépuisable;
- Gros potentiel de développement.

1.3. Les inconvénients

- Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire ;
- L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds
- Retour sur investissement assez long (en moyenne 10 à 15 ans)
- Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...).

2. Le solaire photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont composés des cellules photovoltaïques (PV) à base de silicium, et qui ont la capacité de transformer les photons en électrons.

2.1. Principe de fonctionnement

Lorsqu'une cellule solaire photovoltaïque est soumise au rayonnement solaire, les photons contenus dans le rayonnement absorbé apportent de l'énergie qui libère des électrons de la couche du semi conducteur de la cellule. C'est le mouvement des électrons libérés qui produit le courant électrique. Ce processus de conversion de lumière en électricité est appelé l'effet photovoltaïque.

La lumière est une forme d'énergie et les électrons contenus dans le matériau semi-conducteur se mettent en mouvement lorsqu'ils reçoivent ce supplément d'énergie apporté par les photons de la lumière. Les électrons se déplacent alors librement à l'intérieur du matériau semi-conducteur. La différence de potentiel électrique ainsi créée peut être captée par des fils conducteurs d'électricité vers l'extérieur de la cellule. Si l'on complète alors le circuit électrique par une charge résistive à l'extérieur du panneau solaire, le courant se met à circuler et l'on peut utiliser l'énergie fournie par le panneau solaire, voir figure 2.

Pour augmenter la puissance fournie par les cellules PV, il suffit de les assembler en série afin d'augmenter la tension (Volts) puis on connecte ces sous-ensembles, en parallèle afin d'augmenter l'intensité du courant (Ampères); on obtient ainsi un panneau solaire

photovoltaïque. Ces panneaux solaires peuvent ensuite être connectés entre eux pour former des installations photovoltaïques de plus grande puissance.

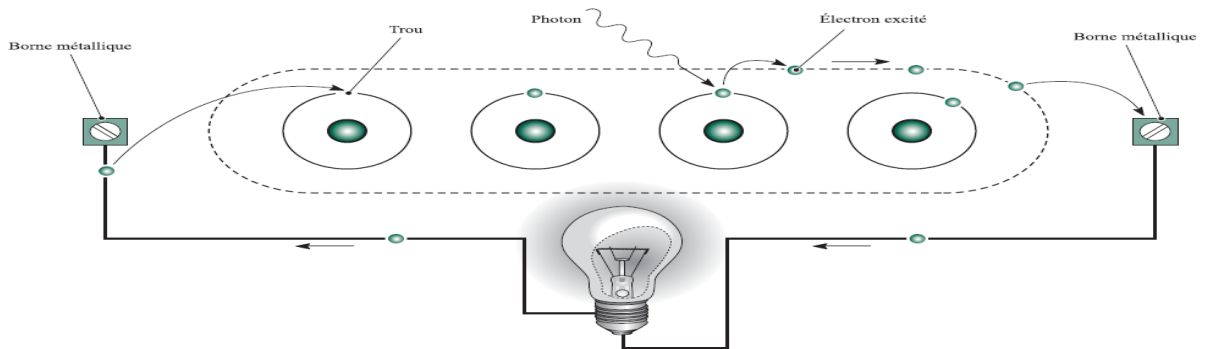


Figure 2 : Description simple de l'Effet Photovoltaïque

Une installation photovoltaïque complète ne comporte pas que les panneaux solaires, elle inclut le matériel de montage, le système de stockage de l'énergie ou le dispositif de connexion au réseau de distribution électrique (onduleurs). La figure 3 résume les éléments essentiels pour une installation photovoltaïque.

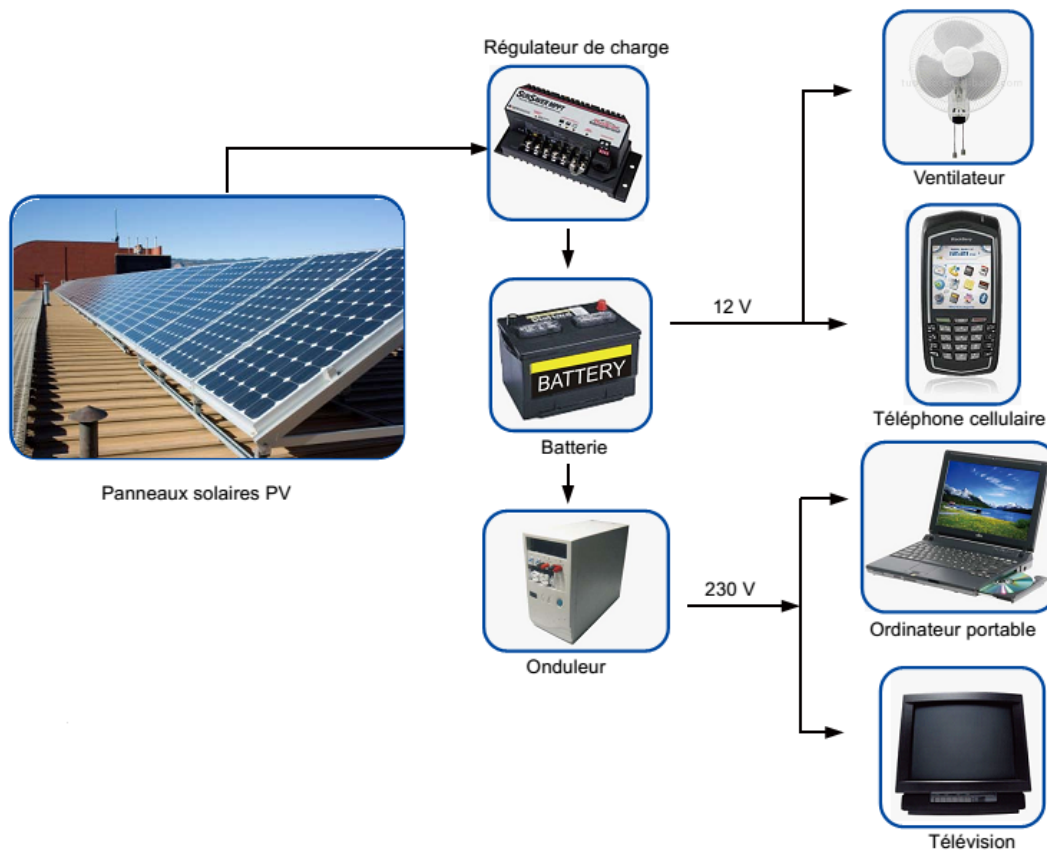


Figure 3 : Représentation d'une installation PV typique.

2.2. Dimensionnement d'une installation PV.

La méthode consiste à estimer à partir des appareils électriques et du tableau ci-après la consommation électrique annuelle du logement considéré. Il s'agit par la suite, d'une approximation de la taille d'une installation photovoltaïque.

Une approximation valable fait que 1 kWc à installer peut garantir environ 1000 kWh/an et nécessite une surface de panneaux de l'ordre de 10 m².

A titre d'exemple, la consommation d'une famille de 4 personnes est de 4000 kWh/an environ. La puissance à installer sera donc 4 kWc, pour une surface de 40 m². il suffit par la suite d'ajouter les équipements (Régulateur de charge, Batteries, Onduleurs et cables) pour compléter l'installation.

Tableau 1: Estimations de la consommation annuelle d'un logement

Appareil	Consommation annuelle KWh/an
Eclairage	
Ampoule Fluocompacte	60
Ampoule incandescence	110
Halogène	600
Electroménager	
Réfrigérateur	300
Réfrigérateur combiné	500
Congélateur	1000
Four	210
Micro onde	220
Plaque électrique	650
Plaque induction	350
Cafetière	30
Bouilloire	70
Lave vaisselle	180
Lave linge	200
Sèche cheveux	8
Fer a repasser	150
Téléviseur LCD	250
Télévisuer cathodique	150
Plasma	500
Ordianteur fixe	120
Ordinateur portable	65
Chauffage	
Chauffage électrique	14000
PAC	7000
Chauffage central	170
Climatisation	
Climatisation	700
Eau chaude sanitaire	
Bain	300
Douche	250
Chaffe eau électrique	entre 400 et 5000

Ainsi on obtient le besoin annuel (Ba = Somme des consommations des appareils) ;
 Sachant que 10m^2 de panneaux développent une puissance de 1000kWh/an ainsi :
 Surface des panneaux = $Ba / 100$.

Une manière plus simple consiste à utiliser les factures d'électricité pour estimer la consommation annuelle réelle.

2.3.Les avantages

- Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable ;
- Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine ;
- Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

2.4. Inconvénients

- Coût du photovoltaïque élevé car il est issu de la haute technologie ;
- Coût dépendant de la puissance de crête ;
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance ;
- Marché très limité mais en développement ;
- Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit ;
- Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé) ;
- Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule ;
- Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production ; Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

3. Le solaire mécanique ou thermodynamique

Le solaire mécanique concerne les appareils qui transforment un rayonnement solaire "directement" en mouvement mécanique qui soit, pourra servir directement, soit sera transformé en électricité.

Le solaire mécanique est une technique rare et très particulière. Chaque "moteur solaire" a des caractéristiques singulières pour ne pas dire uniques. Il est donc très difficile, contrairement aux deux autres utilisations du solaire, de présenter un principe de fonctionnement. Un seul point commun : la concentration de l'énergie solaire via des concentrateurs solaires (héliostats, miroirs...).

Pour présenter cette technique, on peut citer deux exemples pratiques : le moteur Stirling solaire et les centrales solaires thermiques (en réalité : le mot thermodynamiques serait un terme plus adéquat) produisant de l'électricité.

Deux exemples d'installations solaires mécaniques

3.1. Moteur Stirling solaire

Le moteur Stirling, ou moteur à air chaud, est un moteur à combustion externe, le fluide principal est un gaz soumis à un cycle comprenant 4 phases : chauffage isochore (à volume constant), détente isotherme (à température constante), refroidissement isochore puis compression isotherme. La source chaude du moteur peut être alimentée par l'énergie solaire.



Figure 4 : Moteur stirling solaire à Almeria en Espagne (Plataforma Solar)

3.2. Centrales solaires

Ce sont les projets de solaire mécanique les plus aboutis. Une centrale solaire thermique est constituée d'un champ de capteurs solaires spéciaux appelés héliostats qui concentrent les rayons du soleil sur un tuyau dans lequel circule un caloporteur qui actionne une turbine qui produit de l'électricité.



Figure 5 : La plus grande centrale du monde, Désert de Mojave, Californie, USA

La plus grande centrale solaire thermique est appelée *Luz Solar Energy*, elle est située en Californie, sa puissance électrique atteint 354 MW. Il y a 2 autres exemples de telles centrales en France : la centrale solaire de Vignola (Corse-du-Sud) et la Centrale solaire Thémis (Pyrénées), qui a produit son dernier kWh en 1986.

Cependant, après l'installation de la dernière centrale SEGS en 1992, plus de 10 ans se sont écoulés sans aucune nouvelle centrale. Plusieurs éléments peuvent justifier cette constatation :

- Le coût plus élevé de l'électricité provenant des centrales solaires
- une chute du prix de l'électricité à partir de 1986, quelques années après les 2 chocs pétroliers des années 70 et 80.
- La libéralisation du secteur de l'électricité, qui encourage les investissements rentables à plus court terme comme les centrales thermiques classiques.

On constate cependant un regain d'intérêt pour la concentration solaire depuis plusieurs années. On peut par exemple citer l'Espagne, qui propose un prix de rachat minimum de 18 cents/kWh pour l'électricité provenant de centrales solaires. En Californie, le gouverneur Schwarzenegger a mandaté un groupe d'experts pour définir une feuille de route dans le but d'obtenir une puissance totale de 3000 MW d'électricité solaire.

Chapitre 2

L'énergie Eolienne

Introduction

Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité. Elles sont montées aux sommets de mâts afin de bénéficier d'un maximum de puissance. A 30 mètres du sol ou plus au-dessus du sol, elles bénéficient d'une plus grande vitesse de vent, et évitent ainsi les turbulences aérodynamiques qui se trouvent proches du sol. Les éoliennes captent l'énergie du vent par leurs pales en forme d'hélices. Le plus souvent 2 ou 3 pales sont montées sur un axe pour constituer un rotor. Il existe de manière générale deux sortes d'éolienne, à axe vertical et à axe horizontal.

1. Eolienne à axe horizontal

L'architecture de ce type d'éolienne est précisée dans la figure 1, elle est constituée des éléments suivants :

- Le Rotor

Le rotor est en fait l'élément qui capte l'énergie cinétique du vent. Celui-ci est formé de pales (en général 3 pour des raisons aérodynamiques) et de l'arbre principal solidaires au moyen d'un moyeu central. En général, l'ensemble tourne entre 10 et 60 tours par minute.

- La Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Elle est solidaire de la tour au moyen d'un pivot appelé pivot d'orientation.

- La Tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante pour avoir un rendement maximum par rapport au vent (il faut en effet essayer de s'affranchir le plus possible du gradient de vitesse qui est très fort près du sol).

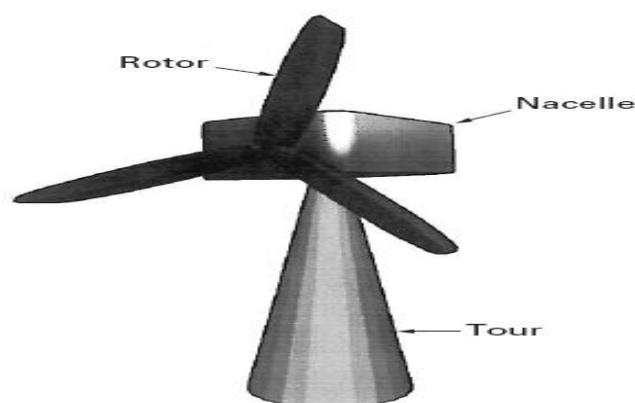


Figure 1 : Description généralisée d'une éolienne à axe horizontal

1.1. Principe de fonctionnement de l'éolienne

Une pale d'éolienne se comporte dans l'air comme une aile d'avion. Lorsque le vent souffle, une dépression d'air se forme le long du « dos » de la pale, de son côté « sous le vent ». Cette dépression aspire alors la pale dans sa direction, ce qui provoque la rotation de l'ensemble rotor. Ce phénomène d'aspiration se nomme « la portance ». La force de portance est en fait bien plus importante que la force dynamique du vent sur la face avant des pales, qui se nomme « la traînée ». La combinaison de la portance et de la traînée provoque la giration du rotor, entraînant à son tour la génératrice d'électricité montée sur le même axe. Une description plus complète du cœur de la nacelle est donnée dans la figure 2.

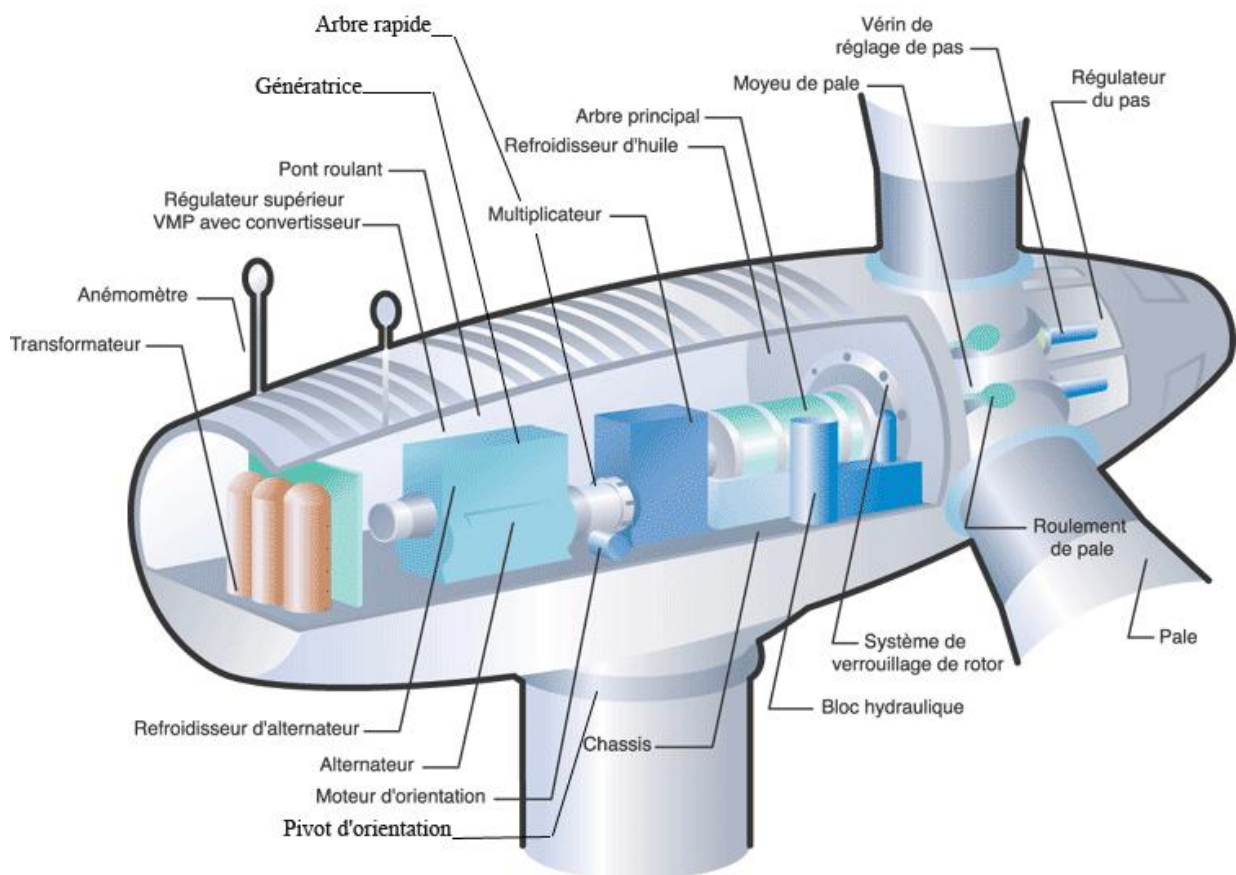


Figure 2 : Description complète de la nacelle d'une éolienne à axe horizontal

Les éléments de la figure 2 sont décrits comme suit :

- Régulateur du pas

Celui-ci permet à l'hélice d'avoir une fréquence de rotation stable à partir d'une certaine vitesse du vent (en général à partir de 3m/s).

- La girouette et l'anémomètre

Ces deux instruments sont en fait des capteurs qui permettent de connaître respectivement l'orientation du vent et sa vitesse. Ils sont placés derrière les pales. Ils prennent les mesures entre deux passages de pales et établissent une moyenne. En fonction de la vitesse et la direction du vent, le pivot d'orientation est mis en fonctionnement à l'aide d'un moteur électrique afin de présenter l'hélice face au vent pour avoir un rendement maximal.

- Système de verrouillage du rotor

Système de sécurité qui permet d'activer des freins si la vitesse du vent est supérieure à 90km/h (25m/s) et qui empêche donc le rotor de tourner.

- Le multiplicateur

Permet de transformer la rotation lente de l'arbre principal en une rotation plus rapide grâce à un système d'engrenages. La vitesse de rotation passe ainsi de 60 tours/minute à environ 1500 tours/minute.

- La génératrice

La génératrice est l'élément clé qui permet de transformer l'énergie mécanique de rotation issue de l'arbre rapide en énergie électrique. Il existe ainsi deux (02) types de générateurs :

☞ Les génératrices synchrones ou alternateurs

Ces génératrices tournent à une vitesse variable en fonction de la vitesse du vent. Ceci produit du courant à voltage et fréquence variable. Ce " mauvais " courant alternatif car irrégulier doit être redressé en courant continu qui doit être encore transformé en courant alternatif de voltage et de fréquence constants par un onduleur. Cette technique de vitesse variable est utilisée par les propriétaires d'éoliennes domestiques qui ne sont pas raccordées au réseau électrique pour une utilisation le plus souvent directe. Mais elle est aussi de plus en plus courante dans les parcs éoliens car les appareils de transformation de courant sont de moins en moins coûteux.

☞ Les génératrices asynchrones

Elles produisent grâce à un champ magnétique du courant directement utilisable, c'est à dire à fréquence constante. Ces génératrices sont utilisées sur des éoliennes reliées directement au réseau de distribution électrique.

- Dispositif de stockage de l'énergie

Il arrive souvent que les éoliennes ne soient pas reliées au réseau électrique et l'énergie produite doit être stockée. Celle-ci est le plus souvent stockée au moyen de batteries le plus souvent au plomb car peu coûteuses. Ce dispositif de batterie impose aussi un dispositif de contrôle car les batteries sont bien souvent très sensibles aux surcharges. Il faut donc un système qui puisse faire fonctionner plusieurs batteries selon qu'elles soient chargées ou non.

- Dispositif de commande automatisée

L'ensemble des capteurs présents dans l'éolienne (girouette, anémomètre, système de régulation des pâles...) renvoient les informations à un ordinateur se trouvant à la base de la tour qui lui permettent de commander l'ensemble des moteurs et organes de l'éolienne.

1.2. Notions de calculs sur les éoliennes

- ☞ Puissance récupérable par les pâles

En théorie la puissance récupérable par les pâles est telle que :

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

P : puissance théorique récupérable en watts

v : vitesse moyenne du vent en m/s

S : surface balayée par les pâles

ρ : masse volumique de l'air en kg/m³

Mais si toute cette énergie était captée, il n'y aurait plus de vent derrière les pales de l'hélice, ce qui n'est jamais le cas. Betz, un scientifique allemand, a montré dans son livre Wind-Energie de 1926 que le maximum d'énergie récupérable est égal à 16/27 de la puissance théoriquement récupérable, c'est-à-dire environ 59%. On arrive à ce coefficient de puissance maximal quand la vitesse du vent en aval des pâles de l'éolienne est égale au tiers de la vitesse du vent en amont. Ainsi pour les meilleures éoliennes :

$$P_{réel} = 0,59 \cdot P \quad (2)$$

- ☞ Puissance en sortie de l'éolienne

La puissance en sortie de l'éolienne dépend principalement de l'énergie récupérable par les pâles, et des rendements du multiplicateur (environ 0,95), de la génératrice (environ 0,8) et des batteries (environ 0,8) de l'éolienne. Ainsi, la puissance en sortie est :

$$P_{sortie} = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,59 \cdot P \quad (3)$$

En général, on ne récupère que 30 à 40% de l'énergie fournie par le vent.

La puissance d'une éolienne est aussi en fonction de la hauteur du mât, la figure 3 donne un aperçu sur l'évolution de la puissance d'une éolienne en fonction de sa hauteur et du diamètre balayé.

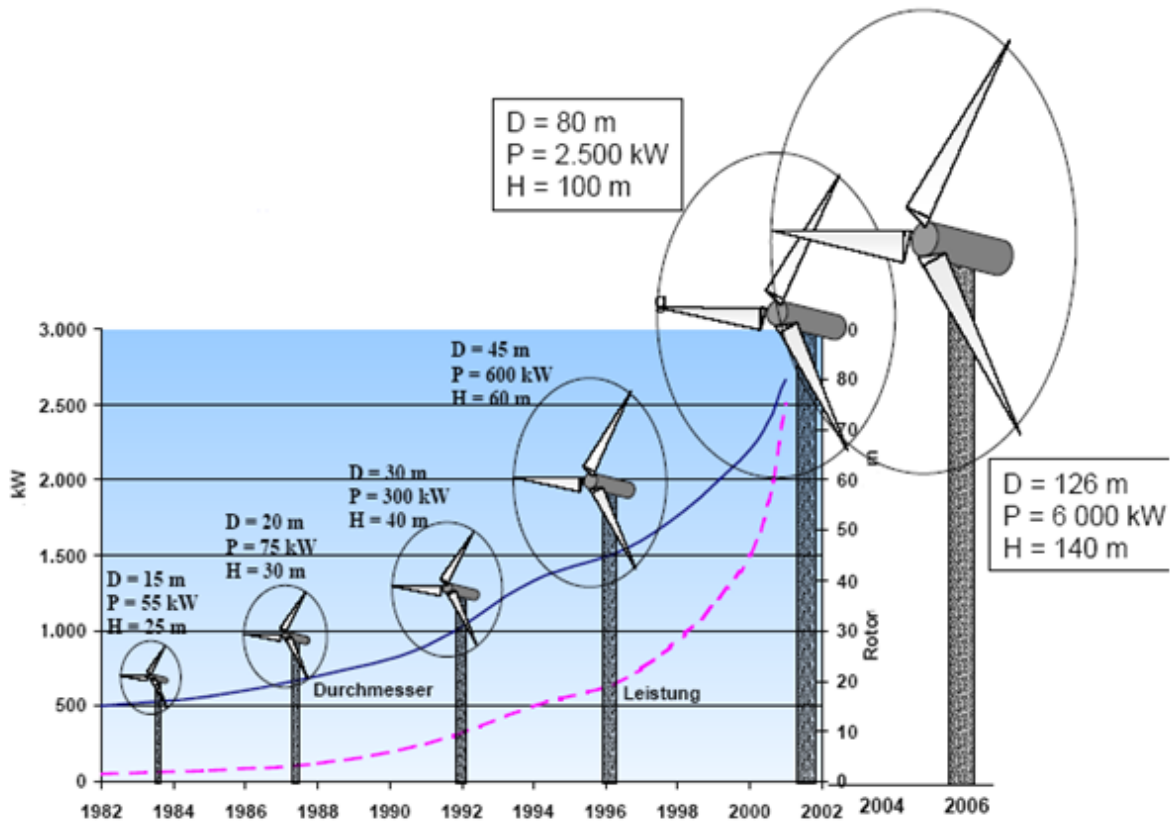


Figure 3 : Tailles des éoliennes déjà installées jusqu'en 2006

1.3. Le vent, un acteur majeur pour l'éolienne

Le vent est la principale source énergétique de l'éolienne, encore faut-il bien savoir l'exploiter. Une explication brève mais efficace va ici nous permettre de mieux comprendre comment placer et où placer les éoliennes pour avoir un rendement maximal et obtenir le plus d'électricité possible. Le vent est un sous-produit de l'énergie primaire provenant du soleil.

La terre et son atmosphère constituent une vaste machine thermique dont la source chaude, constamment variable, est l'hémisphère irradié par le soleil, et la source froide, également variable, l'hémisphère obscur. Le fluide de travail, l'air, passe chaque jour de l'un à l'autre. Ce cycle produit une énergie mécanique qui est l'énergie cinétique de l'air ou vent. Par suite du faible écart de température, de l'ordre d'une dizaine de degrés, le rendement est peu élevé. Néanmoins, étant donné la quantité de chaleur, l'énergie éolienne, pour l'ensemble du globe, est considérable. Toutefois, une petite partie seulement est vraiment récupérable.

La puissance du vent est sensiblement constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, en un lieu donné et sur une période solaire, mais elle varie considérablement en tout lieu et suivant les jours. La vitesse du vent est donc très variable.

Il existe donc une Echelle appelée Echelle de beaufort qui permet de classer les vents en fonction de leur vitesse moyenne dans 12 catégories différentes.

Tableau 1 : Echelle de Beaufort pour la classification des vents

Echelle en degrés beaufort	Nature du vent	Vitesse du vent (moyenne) en m/s
1	Vent insensible et très faible	1
2	Brise infime	2
	Brise légère (les moulins démarrent)	3
3	Vent modéré (frais)	4
4	Vent léger	6
	Brise moyenne (bon frais)	7
5	Forte brise	8
	Grand frais	9
	Très forte brise	10
6	Vent fort	12
7	Vent très fort	15
8	Vent impétueux	20
9	Fort coup de vent	22
10	Tempête violente 1	24
11	Tempête violente 2	30
12	Ouragan	36
	Grand ouragan	46

En plus des différents effets du vent rencontrés en un même lieu, le vent peut avoir de grandes irrégularités à la fois temporelles mais aussi spatiales.

1.4. Irrégularités du vent

☞ Irrégularités spatiales :

En général on peut dire que le vent est le plus faible aux pôles et dans la zone intertropicale et qu'il est maximal vers +/- 55° et qu'il est fort en mer (environ 1 à 2 m/s de plus qu'à l'intérieur des terres). En fait, il se trouve que la vitesse du vent est une fonction croissante avec la hauteur au-dessus du sol et avec l'altitude (par rapport au niveau de la mer). De plus, la loi de répartition de la vitesse suivant une verticale dépend, d'une part, du relief local et, d'autre part, de la rugosité de la région. Ainsi il s'avère par exemple, qu'à même altitude, la vitesse du vent sera plus forte sur une colline que dans une plaine si la rugosité du milieu est identique dans les 2 cas.

☞ Irrégularités temporelles :

En général, Les irrégularités sont maximales à l'échelle du mois. En moyenne, le vent est le plus fort en janvier et le plus faible en juillet.

- ☞ Choisir l'emplacement d'exploitation de l'éolienne en fonction du vent

D'après ce qui a été dit auparavant, on peut maintenant connaître les endroits de placement des éoliennes pour avoir un rendement maximal. Il apparaît tout de suite que les endroits les plus propices sont le **bord de mer**, le **large des côtes** (éoliennes dites offshore), le sommet **des collines** et des **montagnes** dans le cas d'un environnement bien dégagé et peu rugueux. Mais après avoir choisi le site futur d'exploitation, il faut aussi se poser la question du type de vent existant à cet endroit. En effet, un site montrant de fortes variations temporelles (type mistral) sera beaucoup moins bon qu'un site présentant un vent régulier type alizés, ayant une vitesse moyenne de 6 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s.

2. Les principaux intérêts de l'utilisation des éoliennes

- ☞ Sur le plan de l'environnement

Il est clair que l'utilisation du vent pour générer de l'énergie soit bénéfique pour l'environnement. En effet, les éoliennes produisent de l'électricité sans émission de polluants atmosphériques ou de gaz à effet de serre. A l'inverse, les sources d'énergies fossiles rejettent beaucoup de gaz à effets de serre. Tableau comparatif des émissions de gaz carbonique pour la production d'un kilowattheure pour différentes sources d'énergie (source : Mission Interministérielle française de l'Effet de Serre) :

Tableau 2 : Comparaison des rejets de CO₂ pour différentes sources d'énergies

Sources d'énergie	Rejet de CO ₂ en grammes pour la production d'un kWh
Centrale à gaz	470
Centrale à charbon	950
Centrale au fioul	800
Centrale nucléaire	Proche de 0
Ferme éolienne	0

A noter que les centrales nucléaires, comme l'énergie éolienne, ne rejettent quasiment pas de gaz à effets de serre mais elles imposent beaucoup de rejets thermiques, chimiques et parfois radioactifs. Ainsi face à toutes les énergies conventionnelles, l'énergie éolienne apparaît être la moins polluante.

- ☞ Sur le plan sonore

Malgré les idées reçues par les opposants à l'énergie éolienne, cette énergie ne produit pas une très grande pollution sonore. L'énergie éolienne s'est en effet d'abord développée dans des pays aux densités de population élevées (Danemark, Allemagne par exemple).

Les fabricants d'éoliennes ont ainsi dû développer des machines les moins bruyantes possibles, voir figure 4

Ainsi aujourd'hui une grande éolienne ne produit que 40 à 50 décibels ce qui est assez faible par rapport par exemple à un environnement urbain qui se trouve aux alentours des 100 dB.

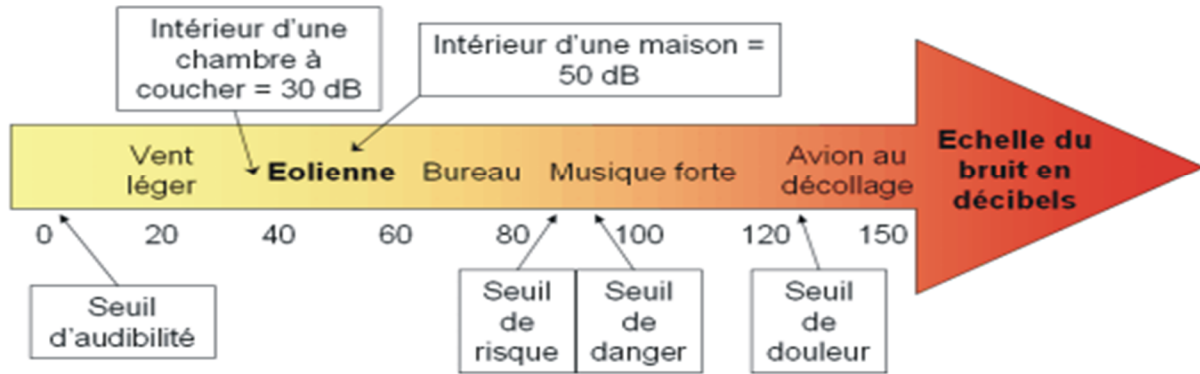


Figure 4 : Echelle du bruit en décibels

De plus, contrairement à d'autres équipements, les éoliennes sont des sources énergies intermittentes, celles-ci ne font du bruit et produisent de l'énergie seulement quand le vent est assez fort. Ainsi il apparaît que les 50 dB d'une grande éolienne apparaissent avec un vent supérieur à 15 m/s, ce qui est largement au dessus de la vitesse moyenne du vent sur un parc éolien qui est de 7 m/s. Ainsi, Dans la pratique, un éloignement de 200 mètres de tout riverain permet de s'affranchir de toute nuisance résiduelle.

☞ Impacts sur l'avifaune :

L'impact des parcs éoliens sur les oiseaux est très variable. Il dépend bien sûr de l'emplacement du parc. Mais une étude réalisée par des scientifiques français montre qu'en général les oiseaux intègrent bien l'existence des éoliennes dans leur habitat. De plus, de nos jours une meilleure connaissance des voies migratoires des oiseaux a permis de réduire le nombre des collisions à un niveau nettement inférieur en comparaison d'autres causes de décès. L'Association Canadienne de l'Energie Eolienne a d'ailleurs comparé le nombre d'oiseaux morts à cause des éoliennes à d'autres infrastructures pour montrer que l'impact des éoliennes sur l'avifaune reste très minime.



Figure 4 : Causes d'accidents mortels chez les oiseaux (nombre sur 10 000 décès)

Chapitre 3

L'énergie Hydraulique

Introduction

Dans un barrage hydroélectrique on exploite l'énergie mécanique de l'eau. Cette énergie provient de la force de gravitation, c'est-à-dire que plus la chute d'eau aura une hauteur importante plus l'énergie mécanique sera importante. En effet, on peut considérer que l'eau stocke une énergie potentielle de pesanteur lorsqu'elle est dans la retenue. Lorsque les vannes sont ouvertes, l'eau s'engouffre dans une conduite, et l'énergie potentielle de pesanteur se transforme en énergie cinétique. Donc, plus l'énergie potentielle de pesanteur est importante, c'est-à-dire une forte différence d'altitude entre la retenue d'eau et la centrale, plus l'énergie cinétique de l'eau au niveau de l'alternateur sera importante, donc une plus grande quantité d'électricité sera produite.

1. Définitions

La définition de l'énergie potentielle est :

$$W = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Avec :

W : énergie potentielle en Joules [J]

m : masse de l'eau en Kilogrammes [Kg]

g : accélération de la pesanteur en mètres/secondes² [m/s²]

h : hauteur de la chute d'eau en mètres, [m]

La définition de la puissance est :

$$P = \frac{W}{t} \quad (2)$$

Avec :

P : puissance utile de la chute d'eau en Watt, [W]

t : durée en secondes [s]

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit:

$$P = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{t} \quad (3)$$

Avec :

ρ : Masse volumique en Kilogrammes/mètres³, [Kg/m³]

V : Volume en mètres cube, [m³]

Ce qui donnera au final :

$$P = \dot{Q} \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Avec :

Q : Débit de la chute d'eau en mètres³/secondes, (m³/s)

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit Q.h doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies.

2. Les différents types de barrages



2.1- Le barrage poids

Il utilise son propre poids pour résister à la force de l'eau retenue. De section triangulaire avec une base large très implantée dans le sol, il sollicite peu la résistance des berges. Dans certains terrains, c'est un avantage. Par contre, il utilise beaucoup de béton.

barrage de Castelnaud Lassouts, en Aveyron



2.2- Le barrage contrefort

Le mur en voûte ou dalle plate qui retient l'eau, est doublé de contreforts qui transmettent la force de l'eau vers le sol. Il nécessite moins de béton pour sa construction, il doit reposer sur un sol résistant et n'est pas nécessairement dans les vallées étroites.

barrage de la Girotonne, en Savoie



2.3- Le barrage voûte

Il est constitué d'une coque en béton à simple ou double courbure et dont l'extérieur est situé à l'amont. En effet, la force de pression de l'eau est transmise aux roches des parois de la vallée grâce à la forme courbe du barrage, qui peut donc être très mince.

barrage de Tignes, en Savoie



2.4- Le barrage en matériaux meubles

Il s'agit d'un barrage poids particulier, car il n'est pas réalisé en béton mais en enrochement de blocs de pierre ou en terre compactée, sans élément de liaison particulier. Il possède une base très large, et il comporte sur toute la hauteur un élément assurant l'étanchéité.

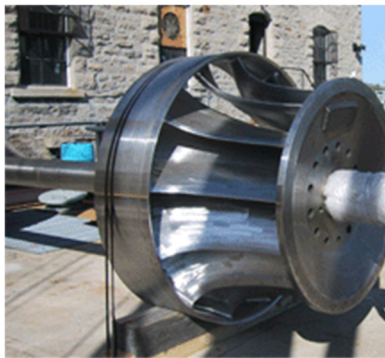
aménagement du Vieux Pré, en Meurthe-et-Moselle

3. Les différents types de turbine

La turbine constitue le cœur de l'installation hydroélectrique, puisque le type de turbine utilisé déterminera l'aménagement d'ensemble de l'installation. La conception hydraulique d'une turbine est déterminée par le débit de l'eau ainsi que la hauteur de chute d'un emplacement particulier. La turbine doit aussi tourner à une vitesse conforme à la vitesse d'un alternateur. La conception des turbines se divise en trois catégories.

3.1- Turbine de type centrifuge

Les turbines Francis



Utilisées par un fort rendement dans des chutes de 40 à 300 m. possédant des immenses réservoirs d'eau elles arrivent à développer une puissance régulière et forte qui couvre généralement les demandes d'électricité. Sa composition est une conduite en colimaçon ou bêche en spirale qui met l'eau sous pression dans les directrices (aubage) qui mettent en mouvement perpétuel la roue et l'arbre de la turbine. L'eau s'échappe ensuite au-dessous de la turbine.

3.2- Turbine de type axial

Les turbines Kaplan :



Les turbines à hélice ou à pas variable (Kaplan). Elles prennent profit des petites chutes de 15 à 30 m. Elles se trouvent au fil de l'eau et n'ont pas de réservoir. La Kaplan a la caractéristique de pouvoir être réglable lors de son fonctionnement. La roue à une forme d'hélice et on peut développer plusieurs variants pour réguler la puissance fournie et l'extraire ainsi des groupes "Bulbes" dont la technique a été développée pour l'usine marémotrice de la Rance, où l'alternateur est collé à la turbine et étanche ce qui

donne un niveau d'indépendance à la turbine tel qu'elle est capable d'être totalement immergée sous l'eau.

La turbine Crossflow

Ce type de turbine est utilisé pour de débits moyens et des chutes de 200 mètres. Son nom technique est turbine à flux traversant et l'eau est attrapée à l'intérieur des augets et traverse 2 fois la roue. Cette fois-ci l'injecteur de la roue est réglé par une aube rotative ouverte à l'aide d'un vérin hydraulique et fermé par un contrepoids. Les aubes sont cylindriques et profilées, et un bâti assure le positionnement des paliers de la turbine. L'une des particularités intéressantes de cette turbine est qu'elle est divisée en 2 parties et peut donc être mise en fonctionnement séparément ou ensemble dépendants des conditions. Elle est aussi autonettoyante car le flux de l'eau peut dégager les débris accumulés.

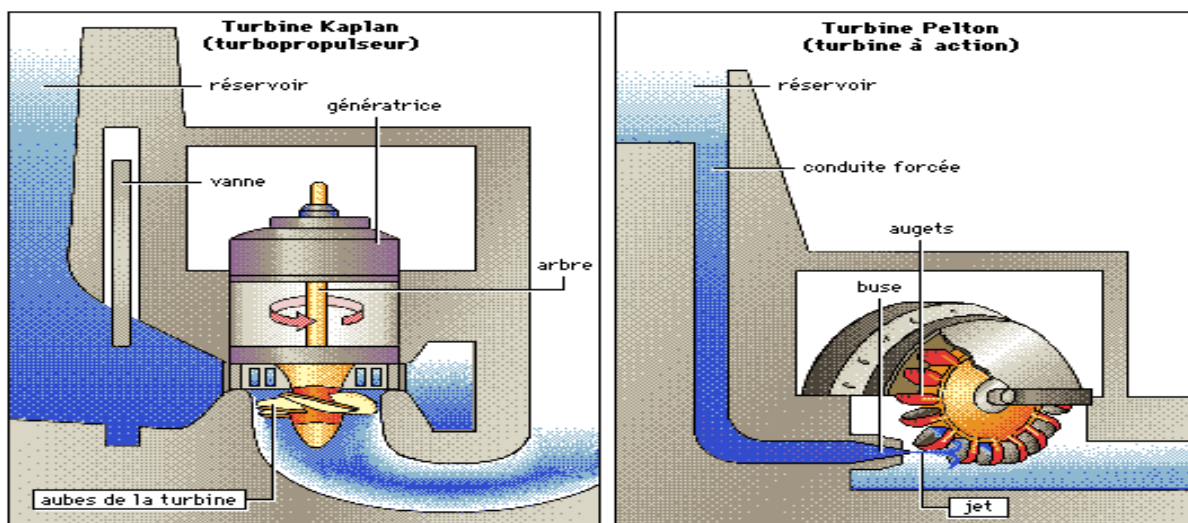


3.3- Turbine de type à impulsion

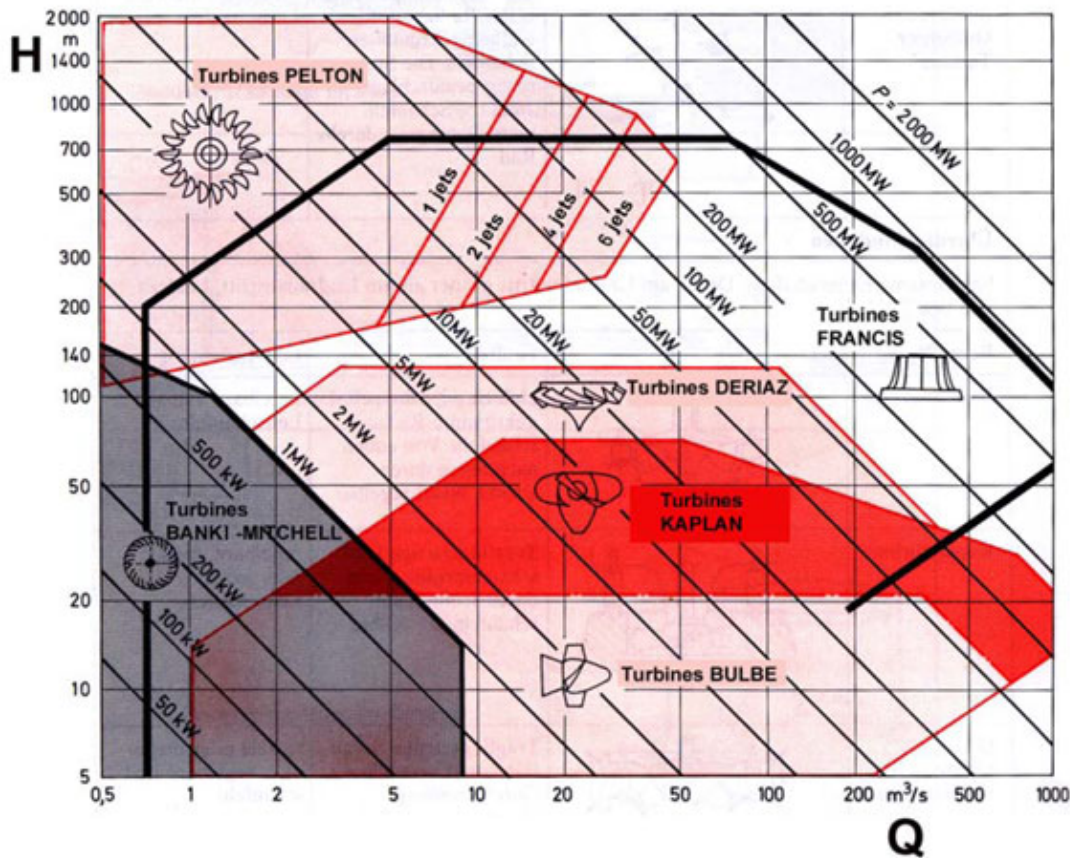
Les turbines Pelton ou Banki à impulsion radiale

Ce sont des turbines utilisées lors des hautes chutes et petits débits. Le débit des injecteurs est réglé avec le pointeau mobile de l'injecteur (comme une vanne), ensuite l'eau sort de manière cylindrique et uniforme. Elle vient immédiatement percuter des cuillères métalliques rattachées à la roue, ce sont les augets. L'eau ensuite glissera sur les côtés de la turbine.

On peut également distinguer les turbines à action (Pelton et Crossflow) des turbines à réaction. Pour les premières, la pression de l'eau à l'entrée de la turbine est égale à la pression en sortie, alors qu'on parle de turbine à réaction si la pression de l'entrée est supérieure à la pression de sortie de la roue. Voici le fonctionnement des turbines Kaplan et Pelton :



Graphe présentant le type de turbine utilisé en fonction des caractéristiques du barrage :



H : La hauteur de la chute d'eau

Q : le débit du barrage

4. Les avantages de la production d'électricité hydraulique

Même si la puissance produite par ces usines est inférieure à celle produite par le nucléaire, l'électricité hydraulique joue un rôle de régulateur du réseau électrique, indispensable pour répondre aux brusques variations de la demande globale, en cas de vague de froid par exemple.

Elle est donc un élément essentiel à la sûreté, à la souplesse et à l'économie globale du parc énergétique

Il est certes impossible de stocker l'électricité, mais les masses considérables d'eau retenues derrière les barrages constituent une énorme réserve d'énergie facilement utilisable.

Enfin, même si les précipitations varient d'un mois et d'une année sur l'autre, l'énergie hydraulique est facilement et rapidement mobilisable : il suffit par exemple de 2 minutes à l'usine de Grand'Maison dans les Alpes pour fournir une puissance de 1 800 MW.

Type d'énergie	Gamme de puissance	Investissement moyen/kW (durée annuelle d'utilisation)	Durée de vie	Coût moyen du kWh	Marché mondial
Hydraulique	1 kW à 12 600 MW	1000-3000 €/kW (5000 heures/an)	50 ans	0,03 €/kWh	38 milliards d'euros
Nucléaire	600 MW à 5000 MW	1200-2300 €/kW (6000 heures/an)	30 ans	0,04 à 0,1 €/kWh	5,5 milliards d'euros

On peut comparer facilement le nucléaire et l'hydraulique, car les centrales produisant ces énergies disposent d'une durée de vie très importante, environ 30 ans pour le nucléaire et 50 ans pour l'hydroélectricité.

Les barrages hydroélectriques ont un éventail de puissance assez large, de quelques dizaines de kW à plusieurs milliers de MW tandis que les centrales nucléaires sont composés de plusieurs réacteurs (généralement de 2 à 4) qui produisent 900 MW.

Par contre, elles sont très différentes en ce qui concerne l'entretien : une installation hydroélectrique demande un grand investissement et ne sera rentable que sur du long terme mais ne coûte pas très cher en matière première et en entretien alors que le nucléaire n'est pas trop cher à la construction mais demande un entretien et un coup d'achat des matières premières très coûteux.

En Europe, le potentiel estimé, en prenant en compte les contraintes environnementales et économiques, correspond à une production électrique de 24 TWh (étude de ESHA – European Small Hydraulic Association).

La capacité installée est aujourd'hui d'environ 10 300 MW, dont 2 100 MW pour la France et 2 300 MW pour l'Italie, les deux premiers Pays en terme de puissance installée.

En France, région Midi-Pyrénées possède le plus grand nombre de centrales hydrauliques de petites puissances (près de 400 - 500 MW de puissance installée), grâce aux réservoirs d'eau que constituent la chaîne des Pyrénées et le Massif Central.

5. Impacts environnementaux

L'hydroélectricité est considérée comme une énergie propre et inépuisable, contrairement au pétrole ou au gaz naturel.

L'utilisation d'énergie de source hydraulique plutôt que provenant de sources non renouvelables est globalement positive pour l'environnement. Cependant les impacts environnementaux peuvent être très importants, surtout lors de la mise en place de structures souvent lourdes permettant la récupération d'énergie hydraulique.

La construction du barrage nécessite du béton et des gravas, ce qui conduit à une dépense énergétique initiale colossale et ce qui est fortement émetteur de gaz carbonique. En effet pour obtenir du béton, il faut chauffer du calcaire à 1450°C pour le décarboniser. Outre la décarbonisation du calcaire, cette importante chaleur est obtenue en brûlant du combustible fossile, qui peut être du fioul, du gaz, des pneus... L'ensemble du processus est fortement émetteur de gaz carbonique. Cependant il faut bien reconnaître que c'est moins pire que de construire une centrale thermique qui brûlera pendant des décennies des millions de tonnes de charbon, de fioul ou de gaz.

Ces impacts varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit d'exploiter les chutes d'eau naturelles, les courants marins, les vagues, mais ils deviennent très importants s'il s'agit de créer des barrages et des retenues d'eau artificielles. Il faut remarquer que dans les projets de barrages, la production d'hydroélectricité est, la plupart du temps, secondaire par rapport à d'autres aspects tels que la maîtrise du flux d'un cours d'eau (évitement des inondations), l'alimentation en eau de canaux, la constitution de stocks d'eau.

Quelle que soit la taille de l'installation, il faut néanmoins faire de sérieuses études d'incidence sur l'environnement avant de construire une installation hydraulique et adopter des mesures compensatoires telles que des échelles à poissons. Par le passé, les barrages construits ont conduit au dépeuplement des rivières en espèces migratrices (anguilles, saumons,...). À ce point de vue, la situation des rivières européennes tend à s'améliorer lentement.

Le bilan en gaz à effet de serre des systèmes hydroélectriques est nettement positif. Il faut néanmoins tenir compte qu'il faut plusieurs années avant que le CO₂ dépensé lors de sa construction soit compensé par l'électricité produite.

- Remise en cause récente des impacts environnementaux :

Certaines recherches récentes émettent de très sérieux doutes sur le bilan en gaz à effet de serre des systèmes hydroélectriques. L'activité bactériologique dans l'eau des barrages (surtout en régions tropicales) relâcherait d'énormes quantités de méthane (gaz ayant un effet de serre 20 fois plus puissant que le CO₂).

Chapitre 4

L'énergie Marine

Introduction

La mer a toujours intrigué les hommes tant par sa puissance que par son imprévisibilité. En effet, depuis l'antiquité, ils essaient de la dompter en utilisant par exemple le vent pour la propulsion des bateaux. A partir du XII^{ème} siècle, des recherches ont été effectuées pour récupérer l'énergie produite par les marées et la houle.

Malheureusement, en comparaison avec le charbon et le pétrole, ces énergies n'étaient pas rentables car les dispositifs d'exploitation étaient trop onéreux par rapport à la quantité d'énergie produite. C'est pourquoi la recherche dans ce domaine-ci est restée limitée pendant longtemps. Par contre, aujourd'hui, elles reviennent au goût du jour parce qu'elles présentent plusieurs avantages comme le non dégagement de CO₂ ou leur non-exhaustivité et se développent sous différentes formes que l'on appelle énergies marines.

Ce terme d'énergie marine ou **énergie des mers**, fait référence aux énergies renouvelables directement extraite du milieu marin ; entre autre :

- l'énergie des marées, ou énergie marémotrice ;
- l'énergie des courants marins ou énergie hydrolienne ;
- l'énergie marée thermique ;
- l'énergie des vagues et de la houle.

Ces diverses formes sont plus ou moins développées. En conséquence, chacune de ses énergies et des exemples de projets en cours seront présentés.

1. L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice vient du mouvement de l'eau créée par les marées. Il est possible d'utiliser l'énergie potentiel créée lors de l'élévation du niveau de la mer ou l'énergie cinétique des courants de marée. L'énergie naturellement dissipée annuellement par les marées est évalué à 22 000 TWh soit l'équivalent de la combustion de moins de 2 Gtep (gigatonnes équivalent pétrole). Ce chiffre est à comparer à la consommation d'énergie de l'humanité, de l'ordre de 10 Gtep. Cependant, seule une fraction de cette énergie étant récupérable mais on comprend bien pourquoi cette source durable, qui ne rejète pas de CO₂ peut être intéressante.

L'idée de l'exploiter n'est pas nouvelle. Dès le XII^e siècle, on trouve des moulins à marée en Grande-Bretagne, en France et en Espagne. En 1607, à Port-Royal, en Nouvelle-Écosse, on construit un moulin qui fonctionne partiellement avec la marée. Ces moulins ne produisent que l'équivalent de 20 à 75 Kw.

Aujourd'hui, les sites adaptés au captage de l'énergie marémotrice restent peu nombreux mais arrive à produire jusqu'à par exemple 500 à 600 millions de kWh par an pour l'usine marémotrice de la Rance.

Mais tout d'abord, commençons par expliquer brièvement les phénomènes de marées pour mieux comprendre comment ce type d'énergie a été et est exploité.

1.1. Le phénomène des marées et formation des courants de marée

Chaque jour en un même lieu, la mer monte, puis redescend, cette oscillation périodique du niveau de la mer s'appelle: Marée. Vue de la côte cette oscillation est d'abord perçue comme un déplacement horizontal, en raison de l'arrivée de l'onde de marée sur les côtes. En effet, le niveau de la mer monte avec le courant de flot, qui amène l'eau vers la côte, recouvrant des étendues plus ou moins grandes du rivage (la Pleine mer = PM) et descend avec le courant de jusant, dans le sens inverse, laissant les mêmes étendues à sec (la Basse mer = BM), voir figure 1. Ce sont les astres, principalement la lune et le soleil, qui engendrent les marées. D'une part, la lune gravite autour de la terre et que le couple terre-lune gravite autour du soleil, les forces gravitationnelles mises en jeu se combinent et attirent la surface déformable de l'eau "en faisant monter le niveau" de la mer en un lieu donné. D'autre part la force centrifuge produit le même effet mais dans la direction opposée à celle du bourrelet d'eau créée par la force gravitationnelle.

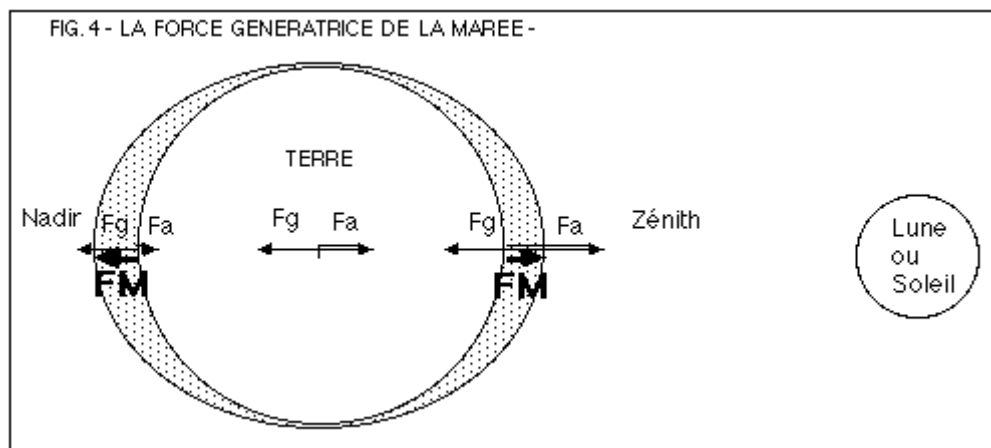


Figure 1 : Forces qui génèrent le phénomène de marée
(F_a , force gravitationnelle d'attraction et F_g , force centrifuge)

D'une part, ceci crée une onde dite de marée amenant la pleine mer. Puis, la position des astres étant en perpétuel mouvement, le lieu ne se trouve plus sous l'effet maximal d'attraction et le niveau de la mer redescend à nouveau, dans ce lieu, jusqu'à la basse mer. A ce moment l'onde de marée poursuit ailleurs son trajet, entraînée par les forces gravitationnelles qui la créent. C'est la propagation de cette onde qui est responsable du phénomène de marée.

L'onde se propage avec une célérité dépendant de la profondeur, se réfléchit sur les talus continentaux, générant des interférences qui peuvent être constructives ou destructives, renforçant ou au contraire atténuant certaines fréquences. C'est ainsi que certains bassins océaniques privilégient les composantes semi-diurnes (2 pleines mers et 2 basses mer) tandis que d'autres privilégient les composantes diurnes (1 pleine mer et 1 basse mer par jour). C'est ainsi également que les marnages sont très variables : ils peuvent atteindre 16 m au Canada, dans la baie de Fundy, mais sont parfois insignifiants, notamment dans les mers fermées, telles que la Méditerranée et la Baltique. D'autre part, les marées génèrent des courants dits de « marée » qui sont à distinguer nettement de l'onde marée entre autre par sa nature : contrairement à l'onde-marée, les courants de marée déplacent les eaux.

Ils sont périodiques et se manifestent différemment au large et près des côtes. Au large ils sont giratoires et font le tour de l'horizon pendant une marée complète. Ils tournent, sous l'influence de la force de Coriolis, vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

La proximité des côtes transforme le courant giratoire en courant alternatif : il se propage dans une direction pendant la première moitié de la marée et dans la direction opposée pendant la seconde moitié. Le courant qui suit la marée montante est alors appelé courant de flot et celui qui accompagne la marée descendante le courant de jusant. Cependant, le courant de marée est déphasé par rapport à la marée; ce déphasage est quasi nul près des côtes et augmente lorsque l'on s'éloigne vers le large. Ainsi, les "renverses" de courant de marée ne correspondent pas nécessairement aux étales de marée : en Manche, les renverses de courant se produisent à la mi-marée. D'autre part, la vitesse d'un courant de marée est proportionnelle à l'amplitude de la marée et varie selon la morphologie côtière : elle augmente par exemple dans les passages resserrés (chenal) et au niveau de 'pointes' : les courants sont ainsi fréquemment accélérés en Manche, dans le raz de Portland, au cap Lizard ...

En un mot, l'énergie potentielle créée lors de l'élévation du niveau de la mer lors de la propagation de l'onde de marée et l'énergie cinétique des courants de marée présente un intérêt plus ou moins grand à être exploité selon la configuration géographique de la zone considérée. C'est pourquoi, le nombre de site utilisant cette technologie reste restreint.

1.2. Exemple d'une Usine marée motrice : l'usine de la Rance

L'usine marémotrice de la Rance fut conçue en 1943 dans la Baie de saint Malo où les phénomènes de marées sont conséquents par la SEUM (Société d'Étude pour l'Utilisation des Marées). Néanmoins, les premiers chantiers ne débutèrent dans l'estuaire de la Rance qu'en 1961. Il s'agissait entre autre de construire :

- un barrage de 330 m de long qui abriterait les turbines
- une écluse pour le passage des embarcations
- une digue mobile en enrochement de 165 m de long
- un barrage mobile constitué de 6 vannes pour l'équilibrage rapide des niveaux (vidage/remplissage du bassin)



Figure 2 : Usine marémotrice de la Rance

Pour des raisons de commodité et de sécurité, il fut décidé de construire l'ouvrage à sec. Il fallait donc élever deux barrages provisoires pour protéger l'ouvrage de l'eau (côté estuaire/côté mer). Le travail dura 2 ans. En juillet 1963, la Rance était coupée de l'Océan et le terrain asséché pour toute la durée de la construction de l'ouvrage qui exigera encore trois ans de travail. Au total il aura donc fallu vingt-cinq ans d'études, six ans de travaux et 620 millions de francs (soit plus de 3.5 milliards de francs réactualisés) pour édifier la première usine marémotrice au monde. Elle fut inaugurée le 26 novembre 1967 par le Général de Gaulle et définitivement reliée au réseau E.D.F. le 4 décembre de cette même année.

1.3. Le principe de fonctionnement

L'estuaire est fermé par une digue capable de retenir un grand volume d'eau. Dans cette digue sont aménagées des vannes par lesquelles la marée montante remplit le bassin de retenue. Lorsque la marée a atteint son plus haut niveau, les vannes sont fermées. On attend ensuite que la mer ait suffisamment baissé de façon à avoir une certaine hauteur de chute entre le niveau du bassin et le niveau de la mer. La chute d'eau permettra de faire tourner une turbine entraînant un alternateur. Dans le cas du simple effet, la production d'électricité sera donc intermittente et suivra le rythme des marées et non le rythme des activités humaines.

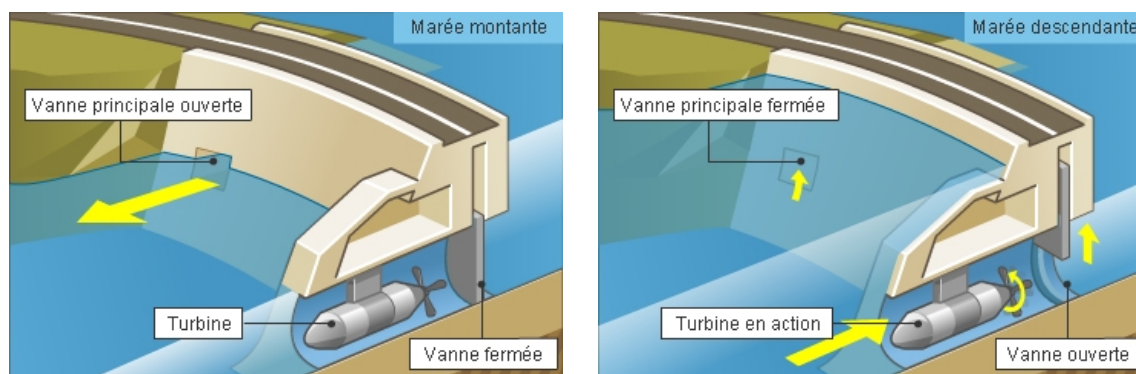


Figure 2 : Principe de l'énergie marémotrice

On peut allonger le temps de marche de l'usine marémotrice en ajoutant un deuxième effet qui permet de produire de l'énergie lors de la phase de remplissage du bassin. Cela suppose de fermer les vannes à la basse mer de façon à isoler le bassin alors presque vide, puis de les ouvrir lorsque la marée est haute. Le double effet implique d'avoir des turbines et des alternateurs capables de fonctionner en tournant dans les deux sens. Ce qui caractérise l'usine marémotrice de la Rance, c'est surtout ses cycles d'exploitation déterminés avant tout par les marées mais également par la disponibilité prévisionnelle des groupes et des vannes et la prévision hebdomadaire de la valeur de l'énergie. Les groupes bulbes qui équipent la Rance ont été spécialement conçus pour fonctionner de cette manière.

2. L'énergie des courants marins

Comme expliqué précédemment, dans les océans, d'énormes masses d'eau se déplacent, mais à des vitesses faibles (10 à 20 km/h). Ce sont les courants marins, dont une partie est provoquée par les marées. Cette énergie cinétique, « énergie marémotrice sous marine, peut être captée par des éoliennes sous-marines, les « hydroliennes ». Les hydroliennes actuellement étudiées ou testées sont de grandes hélices (comme leurs grandes sœurs terrestres), ou des batteries de turbines sous-marines, fixées sur le fond de la mer par 20 à 40 m de fond, ou flottant entre deux eaux.



a) Système Hydrohélice



b) Hydrolienne

Figure 3 : Système d'hydrolienne (Société Hydrohélice)

2.1. Les principaux problèmes des hydroliennes :

Bien que ces systèmes utilisent une énergie inépuisable, non polluante et prédictible, ils présentent de nombreux inconvénient :

- Un coût très élevé dû, entre autres, à des opérations de maintenance lourde ;
- La corrosion des matériaux par l'eau de mer ;
- L'opposition des pêcheurs au chalut, auxquels elles barrent l'accès aux zones où elles sont installées.

3. L'énergie thermique des marées

En raison de la surface qu'occupent les mers et les océans de la Terre, ils se comportent comme un gigantesque capteur pour :

- le rayonnement solaire (direct : flux solaire absorbé par l'océan ou indirect : rayonnement de la Terre réfléchi par l'atmosphère terrestre)
- l'énergie du vent (elle-même dérivée de l'énergie solaire)

Bien qu'une partie de cette énergie soit dissipée (courants, houle, frottements, etc..) une grande partie réchauffe les couches supérieures de l'océan. L'océan reçoit annuellement du soleil une quantité d'énergie équivalente à plus de mille fois la demande mondiale en énergie primaire. En théorie, la différence de température entre les eaux de surface des océans (+25° C dans les régions tropicales) et à 1 000 m de profondeur (5° C) constitue cet énorme réservoir d'énergie. Elle est redistribuée entre l'océan et l'atmosphère. Elle est à l'origine des vents, des vagues, des nuages et des pluies, du réchauffement des régions polaires. Elle détermine les climats.

L'idée de prélever une fraction de cette Énergie Thermique des Mers - ETM - pour la transformer en énergie électrique date de plus d'un siècle.

On a émis l'idée d'installer des méga-pompes à chaleur utilisant cette différence de température afin de récupérer une partie de cette énergie. Mais cette réflexion n'a pour l'instant donné lieu à aucun projet récent. Le problème est qu'avec seulement 20° C d'écart entre l'eau chaude et l'eau froide, on se trouve en limite de fonctionnement technique, et le rendement énergétique serait très faible (2 %) pour des investissements énormes.

4. L'énergie des vagues ou de la houle

L'énergie des vagues n'est jamais qu'une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des courants aériens (vents) eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues).



Figure 4 : Les vagues créées à la surface des mers sont une source d'énergie à explorer

Les vagues à la surface des mers sont donc créées par le vent. Si le vent souffle suffisamment longtemps il se forme une succession de vagues régulières: la houle. Si elle ne rencontre pas d'obstacles cette houle peut se propager sur de longues distances. La houle est caractérisée par sa « hauteur » de vague H exprimée en mètre, c'est la différence d'altitude entre le *creux* et la *crête*, par sa *période* T exprimée en seconde, c'est le temps qui sépare en un endroit donné les passages de deux crêtes (ou bien évidemment deux creux) successives, et aussi par sa longueur d'onde L .

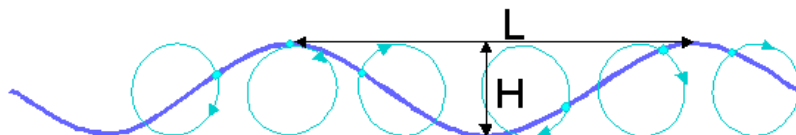


Figure 5 : Schéma montrant certaines caractéristiques de la houle

La quantité d'énergie générée est faible ($1 \text{ W/m}^2/\text{an}$, soit 200 fois moins que d'énergie solaire directe). Mais comme les vagues se déplacent de manière très économe, on peut espérer récupérer presque toute l'énergie créée sur de vastes surfaces marines, en installant des capteurs le long des côtes. La puissance théoriquement récupérable est estimée à 50 kW par mètre de côte. Le problème est que l'énergie tend à se dissiper lorsqu'on se rapproche de la côte : pour 50 kW/m à 20 km de la côte, on peut tomber à seulement 20 kW/m à 1 km de celle-ci. Il faut donc trouver un compromis entre la distance de la côte (les coûts augmentent quand on s'en éloigne) et l'énergie récupérable (qui diminue quand on s'en rapproche). L'énergie des vagues n'est pas la même partout, et elle varie suivant les saisons. Elle est importante en Europe du Nord-Ouest, en particulier le long des côtes britanniques.

4.1. Les techniques

De très nombreux dispositifs ont été expérimentés avec deux grandes catégories : les dispositifs côtiers et les dispositifs de pleine mer (off-shore).

Les premiers utilisent le déferlement des vagues, les seconds utilisent les variations du niveau de la mer lors du passage de la houle. Les premiers sont faciles à construire et à entretenir mais leur rendement est nettement moins bon que les dispositifs off-shore qui exploitent des vagues plus puissantes et plus régulières.

Il existe 3 types de dispositifs pour récupérer l'énergie des vagues :

- des flotteurs en mouvement
- des colonnes oscillantes
- des débordements de chenal

4.2. Récapitulatif

Les énergies marines qui ont longtemps été mise de côté pour des raisons de rentabilité, reviennent en force pour le XXI ème siècle. Toutes les sources que l'océan nous offre peuvent être exploitées d'où la multiplicité des projets en cours dans le monde.

Cependant, certains pays sont avantagé quant à leur situation géographique : l'utilisation des marées est intéressante par exemple en grande Bretagne et au nord ouest de la France ; les courants marins sont exploités dans ces mêmes zones ; par contre ce sont les régions tropicales qui sont plus aptes à utiliser l'énergie thermique des mers.

La production annuelle d'énergie primaire que l'on pourrait extraire des énergies marines serait de l'ordre de 120 000 TWh d'électricité.

Ceci est équivalent à la totalité de l'énergie primaire consommée par l'humanité en l'an 2 000 qui était de 10 000 TWh en 2000 avec 15 % de production renouvelable, pour l'essentiel d'origine hydraulique).

Les contributions respectives des procédés de conversion des phénomènes marins à cette production seraient de:

- 800 TWh pour l'énergie des marées,
- 1 400 TWh pour celle de la houle,
- 18 450 TWh pour l'énergie éolienne,
- 100 000 TWh pour la conversion par l'énergie thermique des mers (ETM).

Ces contributions entraîneraient des perturbations :

- pour l'ETM, de 0,02 % du flux de chaleur solaire absorbé par l'océan,
- de 4 % de l'énergie mécanique du vent « offshore », et
- de 2% de l'énergie mécanique dissipée par la marée.

L'exploitation de ces énergies est intéressante car elles sont inépuisables, non polluante prédictibles et gratuites mais la complexité, le coût et les impacts sur les écosystèmes dans lesquelles elles sont utilisées restent des problèmes qui limitent leur utilisation.

Chapitre 5

La géothermie

Introduction

L'énergie géothermique est l'énergie provenant de la chaleur accumulée dans les profondeurs de la Terre. Il faut savoir que les profondeurs de la Terre comportent un immense réservoir de chaleur qui permet de maintenir l'intérieur de la planète à une température élevée. Cette chaleur produite à l'intérieur de la terre arrive à s'échapper à la surface par l'activité volcanique, les sources d'eau chaude et les geysers.

1. Le principe de la pompe à chaleur géothermale

L'énergie géothermique est réapprovisionnée en permanence par la proximité du magma sous la croûte terrestre et la radioactivité des roches, voir figure 1. L'énergie géométrique s'obtient le plus souvent au moyen de pompes à chaleur, voir figure 2, principe qui est également utilisé pour les forages profonds dans le cadre de travaux de grande envergure ne concernant pas les particuliers.

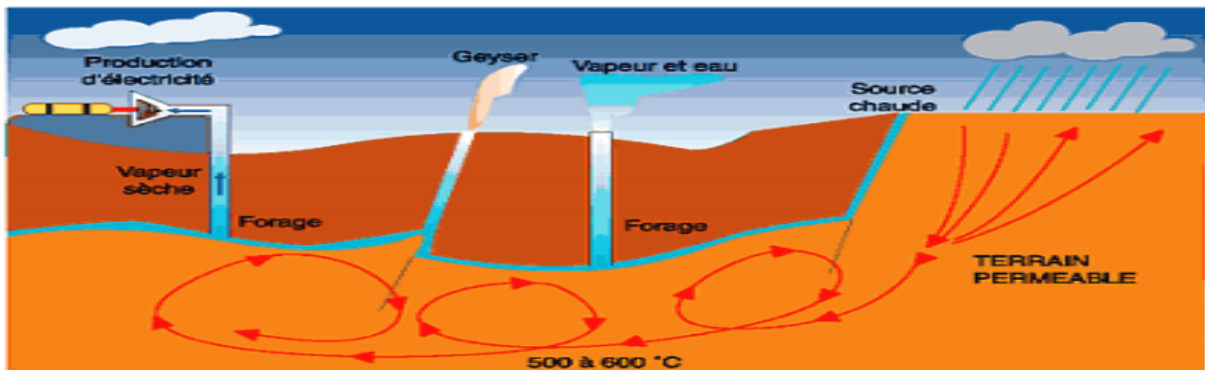


Figure 1 : Principe l'exploitation énergie géothermique

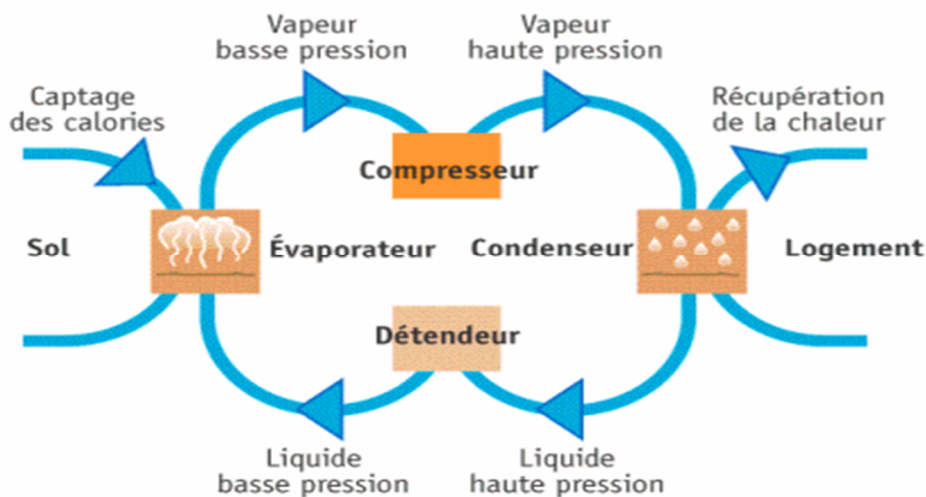


Figure 2 : Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermie

1. Classification de la géothermie

En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

Cette source d'énergie est considérée comme inépuisable, (avec certaines limites), car elle dépend : pour la géothermie profonde, des sources de chaleur internes de la terre, dont la durée de vie se chiffre en milliards d'années ; pour la géothermie de surface, des apports solaires.

2. Exemples d'applications domestique de la géothermie

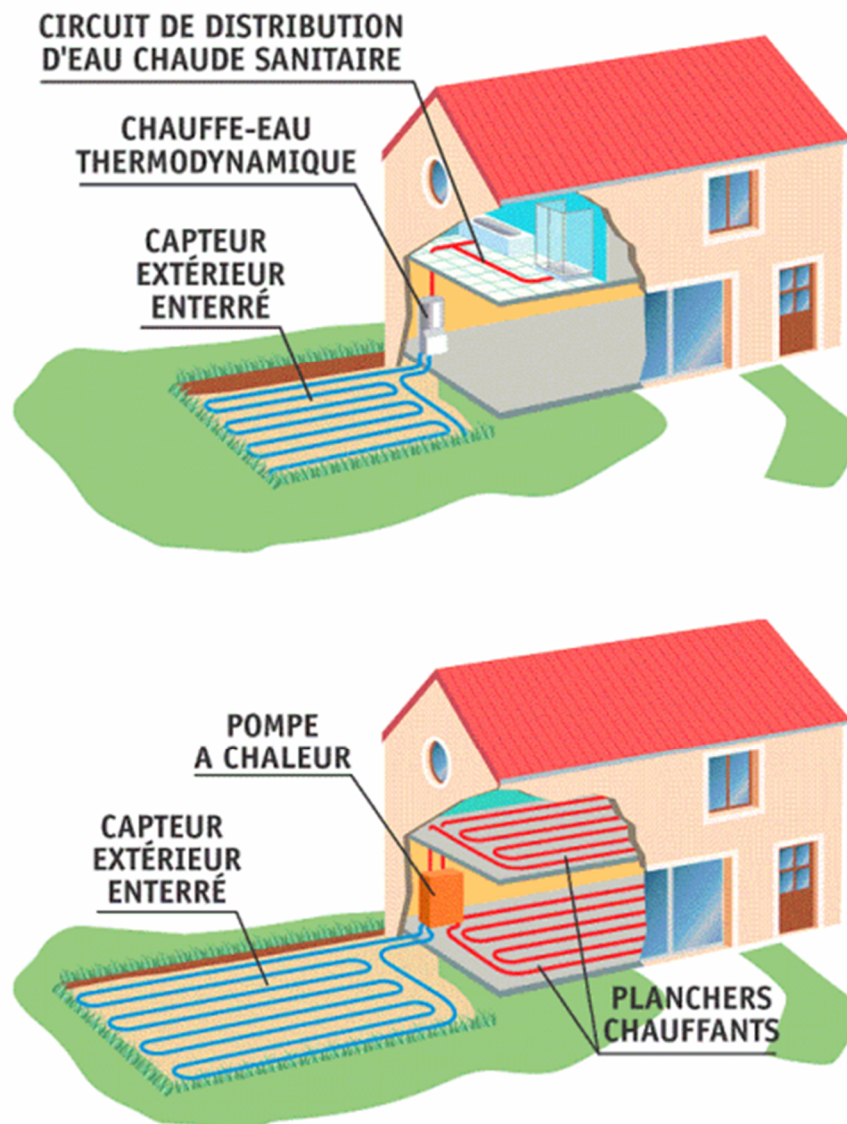


Figure 3. Applications domestiques de la géothermie

Comme il est bien indiqué à la figure 3, on peut utiliser l'énergie thermique issue de la géothermie dans plusieurs applications telles que la production d'eau chaude sanitaire (figure du haut), et le plancher chauffant. La figure 4 récapitule les applications industrielles de la géothermie avec les niveaux de température correspondant.

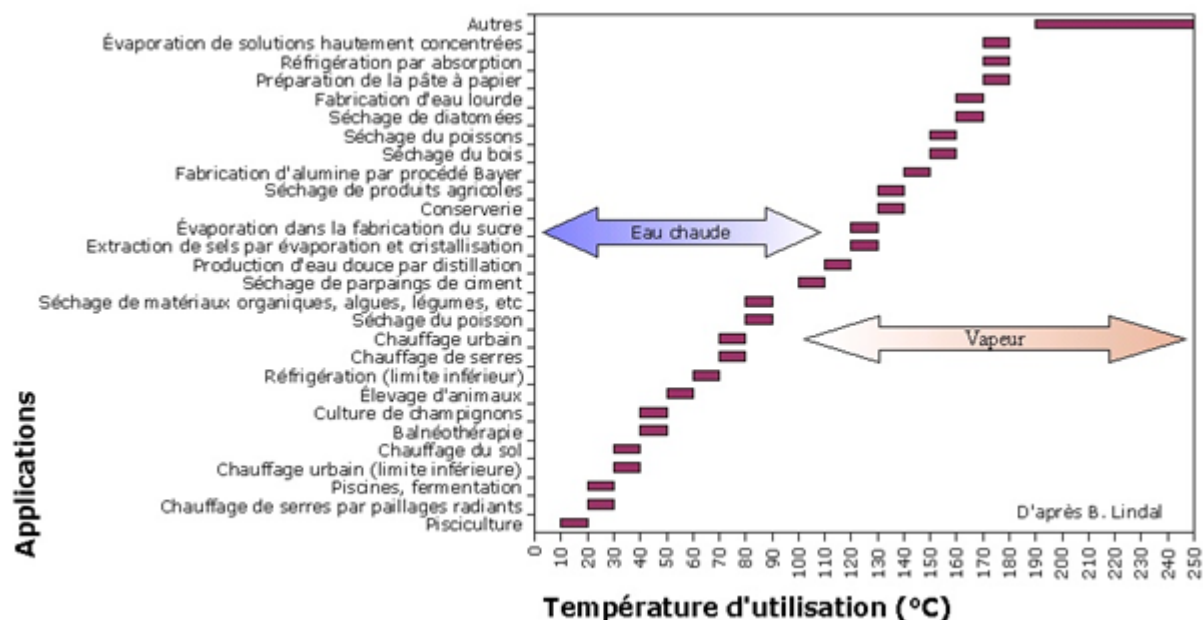


Figure 4 : Applications industrielles de la géothermie.

3. Autres caractéristiques

La géothermie est en générale diffuse et rarement concentrée, avec un flux moyen, de 0,1 MW/km² (0,1 W/m²) et un niveau de température faible. La puissance exploitable économiquement est donc en règle générale réduite. Il arrive cependant qu'elle soit plus concentrée à proximité des failles tectoniques entre plaques terrestres, en particulier des formations volcaniques ou encore dans des formations géologiques favorables.

C'est pourquoi il faut distinguer plusieurs types d'utilisation de la géothermie suivant ses caractéristiques locales:

- la géothermie de surface à basse température: 5-10 °C,
- la géothermie profonde 50-95 °C, jusqu'à 2 000 m de profondeur,
- la géothermie très profonde à haute et très haute température, jusqu'à 10 000 m
- la géothermie volcanique de type geyser.

4. Comment produit-on de l'électricité avec la géothermie ?

La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide (isobutane, isopentane, ammoniac) qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

5. La disponibilité des ressources géothermiques

Cette chaleur est variable selon les zones. À la surface du globe, le flux géothermique moyen est faible (il s'agit de l'énergie disponible pour une superficie et une période données). Ce flux s'élève à 0,06 watt par mètre carré et par an, soit 3 500 fois moins que le flux d'énergie solaire reçu en une année par la même surface de sol ! C'est pourquoi on cherche à exploiter en priorité les ressources calorifiques de certaines zones susceptibles de fournir des quantités d'énergie importantes. Ces « réservoirs géothermiques » sont disponibles dans tous les bassins sédimentaires de la planète mais la géothermie haute énergie se situe surtout à proximité de volcans. Dans ces zones, le flux géothermique peut atteindre 1 watt/m²/an.

Les réservoirs géothermiques ont tendance à s'épuiser au fur et à mesure de leur exploitation, certains plus rapidement que d'autres. Leurs capacités de renouvellement reposent sur :

- Des sources de chaleur internes à la croûte terrestre (radioactivité essentiellement et chaleur résiduelle) ;
- des apports d'énergie venus de l'extérieur du réservoir (chaleur solaire) pour les usages de très basse température au moyen de pompes à chaleur (PAC). Assurer ces conditions de réchauffement se révèle d'autant plus crucial pour les PAC géothermales que le sous-sol est également refroidi par des facteurs extérieurs : en hiver, par exemple, on y récolte moins de chaleur ;
- la circulation des eaux souterraines qui leur permet de se réchauffer au contact de sources de chaleur éloignées du réservoir, avant de réintégrer celui-ci. Ainsi, pour pouvoir exploiter un réservoir de manière durable, on doit veiller à la reconstitution progressive de ses ressources calorifiques. Cela passe par le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation dans le temps de l'exploitation du site.

En outre, la disponibilité de l'énergie géothermique est limitée géographiquement. Le transport de la chaleur sur de longues distances génère en effet d'importantes pertes thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation pour couvrir les besoins en énergie.

Chapitre 6

La biomasse

(Les biocarburants et le biogaz)

Introduction

Un biocarburant issu de la biomasse est un carburant liquide ou gazeux créé à partir de la transformation de ces matériaux organiques non fossiles, par exemple des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, etc.). Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x).

1. Les catégories de biocarburants

On distingue trois générations de biocarburants :

1.1. Les biocarburants de première génération

Ils sont principalement de deux types :

- Le bioéthanol : il est produit à partir de canne à sucre, de céréales et de betterave sucrière. Il est utilisé dans les moteurs à essence ;
- Le biodiesel : il est dérivé de différentes sources d'acides gras, notamment les huiles de soja, de colza, de palme et d'autres huiles végétales. Il est utilisé dans les moteurs diesel.

Les biocarburants de première génération entrent en concurrence directe avec la chaîne alimentaire. Ils sont produits à partir de matières premières qui peuvent être utilisées dans une chaîne alimentaire animale ou humaine. Aujourd'hui, seule cette génération est produite à l'échelle industrielle.

1.2. Les biocarburants de deuxième génération

Des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter les matières cellulosiques telles que le bois, les feuilles et les tiges des plantes ou celles issues de déchets. On qualifie ces matières de biomasse ligno-cellulosique car elles proviennent de composants ligneux ou à base de carbone qui ne sont pas directement utilisés dans la production alimentaire. Ces caractéristiques présentent un avantage de disponibilité supérieure et de non concurrence alimentaire par rapport à la première génération de biocarburants.

Cette technologie permet de produire du bioéthanol dit de deuxième génération, du biodiesel, du bio-hydrogène ou du biogaz. Elle n'est pas encore déployée au stade industriel mais des perspectives de mise en application à moyen terme se dessinent. Leur production à grande échelle est prévue à l'horizon 2020-2030.

1.3. Les biocarburants de troisième génération

Les procédés, encore à l'étude, s'appuient principalement sur l'utilisation de microorganismes tels que les microalgues. Celles-ci peuvent accumuler des acides gras

permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres. A partir de ces acides gras, il est possible de générer du biodiesel. Certaines espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol. Enfin, les microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz. Certaines d'entre elles peuvent également produire du bio-hydrogène.

2. Fonctionnement technique ou scientifique

Les principales techniques de production des carburants de première génération sont les suivantes :

- Le bioéthanol : le processus de fabrication transforme le sucre de la matière végétale en alcool (éthanol) par fermentation. Il est mélangé à l'essence soit directement, soit sous une forme chimique différente ;
- Le biodiesel : il est fabriqué à partir de la réaction entre une huile végétale semi-raffinée, obtenue principalement à partir des huiles végétales (colza, tournesol) avec un alcool. Le processus est appelé « transestérification » : les huiles végétales sont mélangées à froid à un alcool en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium ou de potassium). Le biodiesel est mélangé uniquement au gazole.

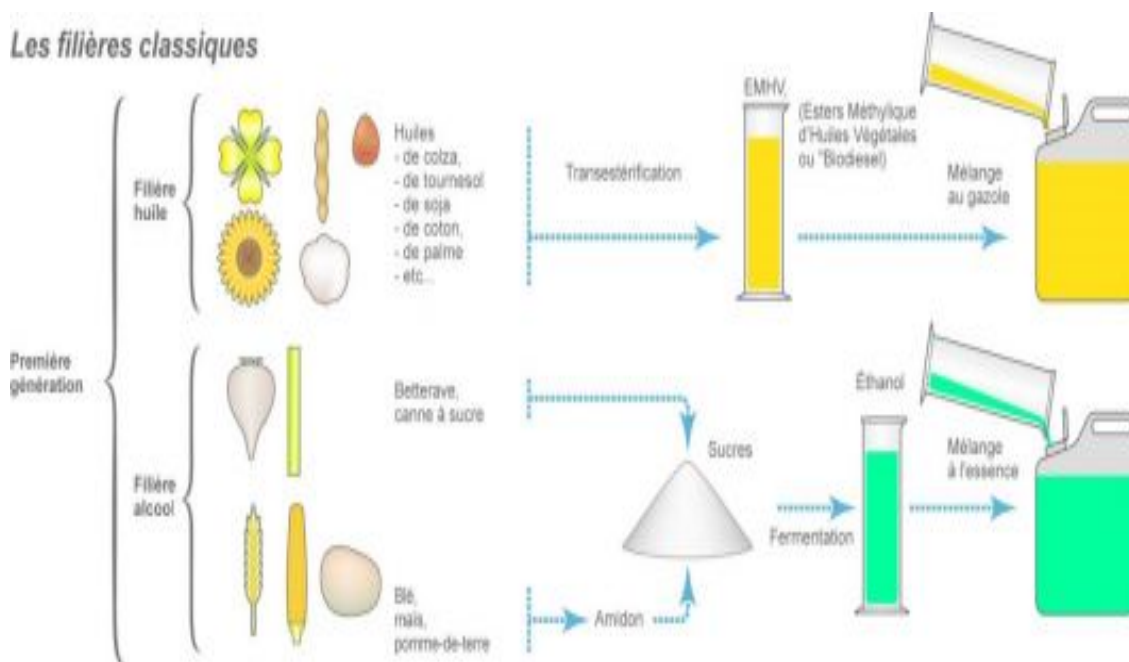


Figure 1 : Biocarburant de première génération (source IFP)

3. Le Biogaz...parlons en !

En l'absence d'oxygène (digestion anaérobie) et à l'abri de la lumière, la matière organique est dégradée partiellement par l'action combinée de plusieurs types de micro-organismes. Une suite de réactions biologiques, conduit à la formation de biogaz (composé majoritairement de méthane) et d'un digestat comme in est présenté dans la figure ci contre. Le biogaz pourra être valorisé en électricité et en chaleur, le digestat sera épandu comme engrais de ferme.

3.1. La composition du Biogaz

La méthanisation produit du biogaz qui est **majoritairement constitué de méthane** (environ 60 %). Un mètre cube de biogaz possède un pouvoir calorifique d'environ 9.7 kWh soit l'équivalent énergétique de 1 litre de Mazout. Le biogaz est corrosif et toxique (présence d'hydrogène sulfuré), des précautions doivent donc être prises, pour à la fois, garantir la sécurité des personnes, et également éviter la dégradation rapide du matériel (principalement du moteur). Le biogaz provenant de déjections animales est particulièrement riche en hydrogène sulfuré. **Le biogaz doit donc être partiellement épuré avant utilisation.** Cette épuration est réalisée grâce à l'injection d'un petit débit d'air directement dans le ciel gazeux, celui-ci provoque une précipitation du soufre dans le digesteur (et/ou dans le stockage de biogaz), au niveau de l'interface gaz/liquide, le soufre se retrouve alors dans le digestât.

3.2. Avantages de l'utilisation du biogaz

- L'énergie

La technologie du biogaz repose sur un concept de recyclage des déchets lors duquel la masse organique est convertie par fermentation méthanique en énergie (méthane : CH₄) simple, propre et prête à satisfaire un grand nombre de besoins énergétiques de manière totalement décentralisée.

- L'hygiène

Les excréments et autres déchets organiques vecteurs de germes pathogènes et responsables d'un certain nombre de maladies ne subissent dans la plupart des cas aucun traitement particulier et sont le plus souvent déposés partout en contact avec les populations. Le traitement de ces déchets par la technologie du biogaz peut offrir des éléments de réponse à tous ces problèmes et ce par :

- La destruction de nombreux germes pathogènes,
- L'élimination des odeurs par une stabilisation de la matière organique,
- La protection des eaux de ruissellement et souterraines,
- La diminution des émissions des gaz à effet de serre (méthane).

- L'engrais

Pendant le processus de fermentation aucun nutriment n'est retirée des déchets organiques, la valeur de fumure de la masse organique n'est pas seulement préservée, mais encore accrue du fait de la minéralisation partielle de l'ensemble de l'azote. L'engrais organique qui contribue essentiellement à l'amélioration de la structure des sols, peut ainsi être absorbé plus rapidement par de nombreuses plantes. En outre, les graines et les mauvaises herbes sont détruites lors du processus de fermentation.

Chapitre 7

L'hydrogène et le stockage de l'énergie

Introduction

Les énergies renouvelables se caractérisent généralement par un rendement relativement faible, un coût important et surtout une intermittence de la ressource. Des systèmes utilisant l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde. Ils deviennent de plus en plus efficaces et rentables. Par ailleurs, l'utilisation des ressources renouvelables, en dehors des grands hydrauliques, reste généralement limitée aux sites isolés où le coût des systèmes renouvelables devient compétitif par rapport aux autres moyens de production d'électricité du fait de l'acheminement très coûteux de l'électricité.

Ainsi, ce développement est encore freiné par ces problèmes liés à leur nature répartie, à faible densité énergétique et à production irrégulière.

☞ *La problématique du stockage d'énergie...*

En plus des problèmes d'irrégularités des ressources renouvelables, un autre paramètre apparaît comme un réel handicap pour l'utilisation de ces sources, il s'agit du stockage d'énergie.

Pour la plupart des énergies renouvelables, le stockage se fait à court terme. En effet, dans le cas du photovoltaïque, le stockage d'énergie électrique dans des batteries ne peut durer que quelques heures ; quant à l'éolien, l'excès de vent pourra être emmagasiné sous forme de volant d'inertie, l'excès de l'énergie électrique pourra aussi être utilisé pour comprimer de l'air afin de l'utiliser en cas de faible vitesse de vent.

En période de faible consommation, l'énergie produite par l'éolienne pourra être utilisée dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau par un électrolyseur qui pourra être à son tour stocké puis utilisé comme combustible dans une pile à combustible pour produire de l'électricité lorsque la demande est forte ou par manque de vent.

☞ *L'hydrogène est donc présenté comme un très bon candidat à cette fonction pour le futur, car sa capacité de stockage de 30000 Wh.kg⁻¹ est trois fois plus élevée que celle de l'essence et une utilisation bien maîtrisée ne présente que peu de risques, tout comme celle du gaz naturel,*

1. L'hydrogène comme vecteur énergétique

L'hydrogène représente le bon choix comme future source d'énergie non polluante pour de nombreuses raisons. En voici quelques-unes de ces raisons :

- L'hydrogène peut être produit à l'aide de plusieurs sources. Il est tout à fait renouvelable car l'élément de départ le plus abondant et le plus propre pour produire de l'hydrogène est l'eau.

- L'hydrogène peut être stocké à l'état gazeux, à l'état liquide, ou à l'état solide. Il peut aussi être stocké dans différentes substances chimiques telles que le méthanol, l'éthanol, ou les hydrures métalliques.
- Il peut être produit à partir d'électricité ou converti en électricité avec un bon rendement.
- Il peut être transporté et stocké avec autant de sécurité que les combustibles utilisés de nos jours.

Comparé à d'autre combustible, l'hydrogène est désormais un bon concurrent, le tableau suivant présente quelques éléments de comparaison.

Propriétés	Hydrogène	Methane	Methanol	Ethanol	Propane	Essence
Masse Moléculaire (g/mol)	2,016	16,043	32,04	46,06	44,1	~107
Densité (kg/m ³) à 20°C	0,08375	0,6682	791	789	1,865	751
Point d'ébullition (°C)	-252,8	-161,5	64	78,5	-42,1	27-225
Point d'éclair (°C)	<-253	-188	11	13	-104	-43
Limites d'inflammabilité dans l'air (% volume)	4,0 - 75,0	5,0 - 15,0	6,7 - 36,0	3,3 - 19	2,1 - 10,1	1,0 -7,6
CO ₂ produit par unité d'énergie	0	1	1,5			180
Température d'auto-inflammation dans l'air (°C)	585	540	385	423	490	230 - 480
Pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg)	142	55,5	22,9	29,8	50,2	47,3
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)	120	50	20,1	27	46,3	44

1.1. La filière technologique de l'hydrogène

La filière hydrogène ou autrement dit, la production et les applications de ce vecteur énergétique très important est composé de plusieurs variantes, la figure 1 présente cette filière. Nous pouvons constater trois domaines d'applications. En effet, dans le domaine du transport, l'hydrogène peut être utilisé dans les moteurs à combustion interne et dans les moteurs électriques alimentés par des piles à combustible. Le secteur bâtiment bénéficie aussi de l'hydrogène vu qu'il existe des piles à hydrogène adaptées aux usages bâtiments commerciaux, résidentiels ou même tertiaires.

En industrie, l'hydrogène peut servir comme le vecteur énergétique de plusieurs applications telles que la cogénération par des piles à hydrogène, des turbines ou même des moteurs à combustion interne, son application dans des procédés de synthèse demeure aussi possible.

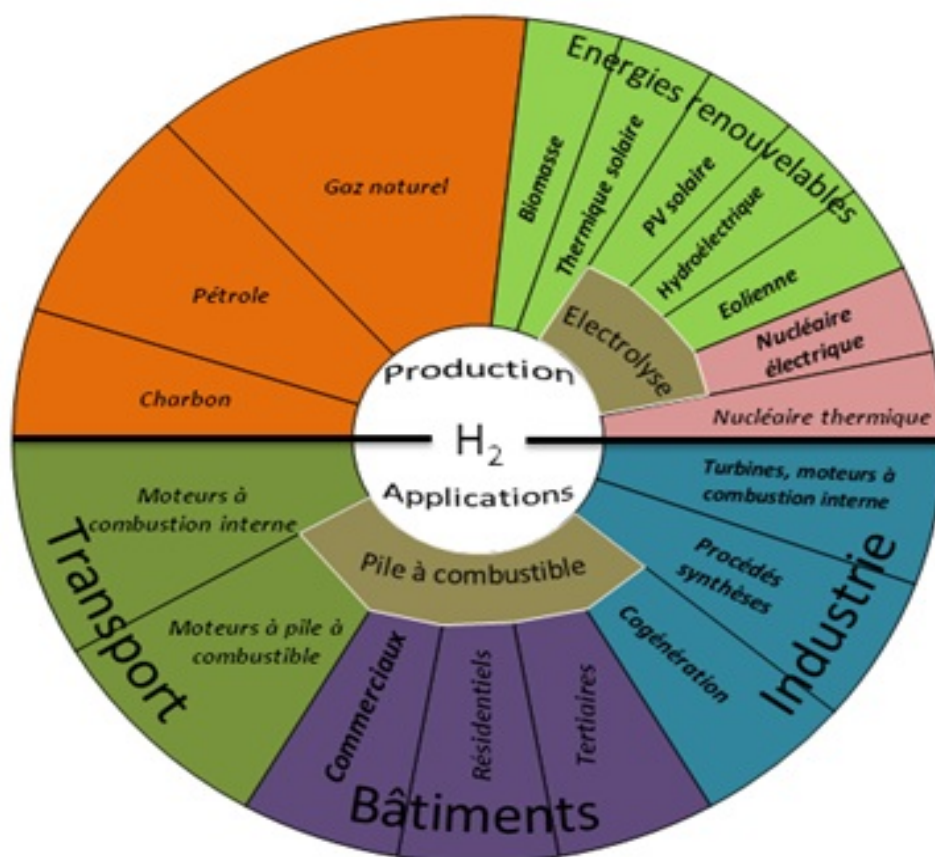


Figure 1. Filière technologique de l'hydrogène

1.2. La pile à combustible

Le développement de la filière hydrogène repose en grande partie sur la technologie de la pile à combustible (PàC). Son principe n'est pas nouveau, puisqu'il fut découvert dès 1839 par William R. Grove qui inventa la première pile à combustible. À l'époque, cet avocat anglais, chercheur amateur en électrochimie, constate qu'en recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, il est possible de créer simultanément de l'eau, de la chaleur et de l'électricité et c'est ainsi que la pile à combustible est née. Cette pile à combustible qui est considérée comme un convertisseur électrochimique fonctionnant selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, peut être un des éléments de diversification des ressources énergétiques. De la micro PàC, qui ne produit que les quelques watts nécessaires à l'alimentation d'un téléphone mobile, à la pile capable de produire 1 MW pour fournir de l'électricité à un immeuble collectif, en passant par la pile destinée aux applications embarquées, dans le secteur des transports, il existe désormais toute une gamme de PàC.

Les piles à combustible constitueront l'un des éléments essentiels de la future économie de l'hydrogène, ils ont la capacité de subvenir à tous nos besoins en énergie tout en offrant un haut rendement et une technologie à très faible degré de pollution.

La pile à combustible à membrane polymère électrolytique (appelée aussi proton exchange membrane PEM), sujet de recherche de ma seconde tâche scientifique attribuée par la division, fournit une haute densité de puissance et un poids moindre, un coût raisonnable et un faible volume.

Une pile à combustible PEM comprend une électrode chargée négativement (anode) une électrode chargée positivement (cathode), et un électrolyte, (la membrane). L'hydrogène est introduit du côté de l'anode et l'oxygène est introduit du côté de la cathode. Les protons sont transportés de l'anode vers la cathode, à travers la membrane électrolytique et les électrons circulent par un circuit externe représenté par la charge, voir Figure (2). Une pile à combustible PEM typique comporte les réactions suivantes:

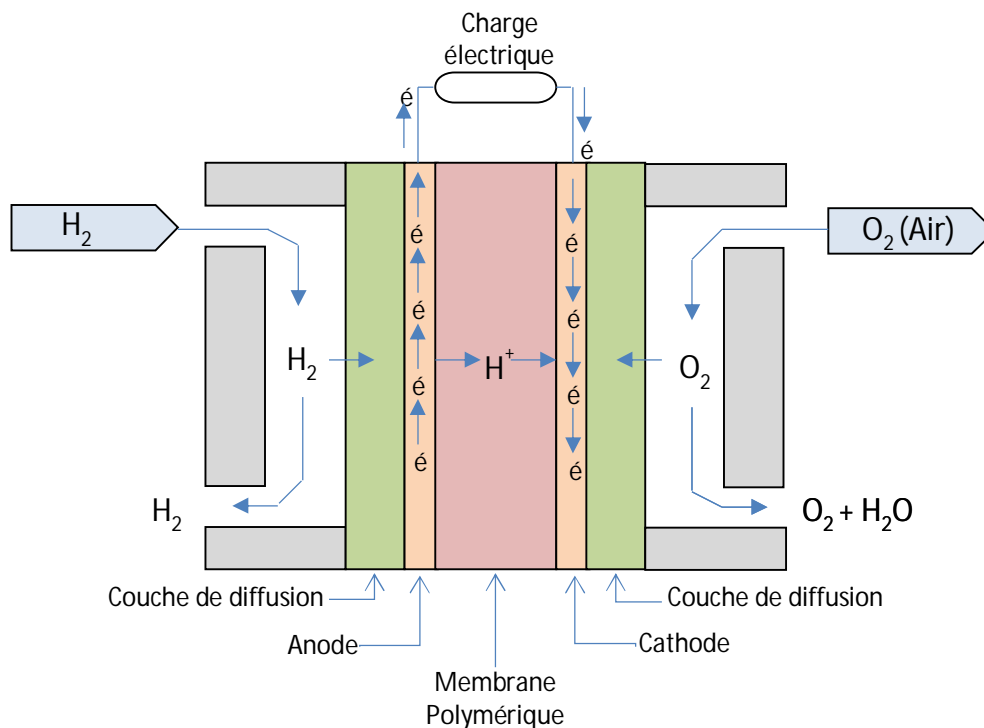
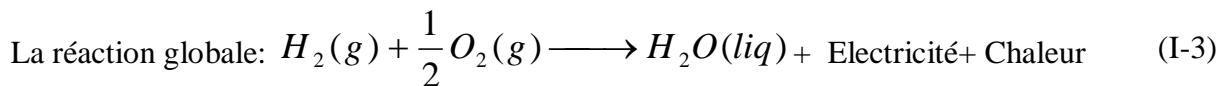
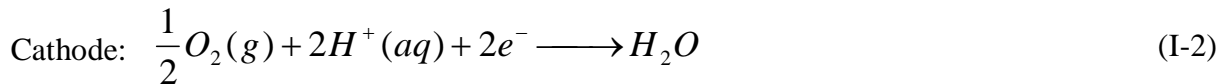
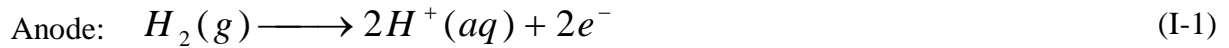


Figure 2. Schéma décrivant le principe d'une pile PEM

Ces piles travaillent à une température inférieure à 100°C pour un rendement de l'ordre de 50%. La faible température de fonctionnement leur confère une aptitude à démarrer relativement rapidement.

Ces piles sont développées pour alimenter en énergie des véhicules et des installations fixes de petite ou moyenne taille. La gamme de puissance des piles PEMFC se situe de quelques dizaines de watts à une dizaine de mégawatts.

Caractéristiques de fonctionnement

Le tableau suivant résume les caractéristiques et les performances de la PEMFC :

Caractéristiques et Performances	
Température de fonctionnement	60 à 80 °C
Pression de fonctionnement	1 à 3 bars
Rendement électrique	40 à 50 %
Tension réelle	0,6 à 0,95 V
Densité de courant	Jusqu'à plusieurs A/cm ²
Temps de démarrage	Pratiquement instantané
Temps de réponse à une variation rapide de demande	Très rapide
Durée de vie	1000 à 2000 heures (valeur en 2005) Jusqu'à 4000 heures [HFC Consulting Group] Des essais actuelles pour atteindre les 8000 heures.

Avantages et inconvénients

Ces piles cumulent certains avantages:

- Temps de démarrage très rapide ;
- Temps de réponse très rapide ;
- Compacité ;
- Insensible au CO₂ ;
- L'électrolyte est solide. Il n'y a donc pas de risque de fuite de l'électrolyte ;
- La température de fonctionnement est faible ;
- La puissance massique est élevée, la densité de puissance peut atteindre 1kW/kg.

Elles présentent cependant certains inconvénients :

- Coût élevé de la membrane ;
- Les membranes doivent être impérativement maintenues en permanence dans un bon état d'hydratation pour favoriser le transport des protons. Dans le cas contraire ; il y a un risque de détérioration de la membrane ;
- Elles sont sensibles au monoxyde de carbone qui empoisonne les sites catalytiques.

Vieillessement

Dans une pile PEMFC, les composantes sont soumises à un vieillissement chimique ou mécanique dont les principales causes sont :

- Dégradation de la membrane sous l'effet de la température ;
- Perte d'activité catalytique ;
- Hétérogénéité des matériaux utilisés ;
- Humidité de la membrane non parfaitement contrôlée.

2. Le stockage de l'énergie

Principales formes d'énergie renouvelables (sauf géothermie et marémotrice) sont stockées :

- A court terme : énergie hydraulique et éolienne
- A moyen terme : biomasse
- A long terme : combustibles fossiles

2.1. Nécessité de stocker l'énergie dans le contexte actuel

- Développement des énergies intermittentes
- Fluctuations des consommations
- Augmentation des productions décentralisées
- Nouvelles technologies de communication

2.2. Le stockage de l'énergie mécanique

Stockage sous forme d'énergie potentielle

- Barrage hydraulique et pompage de l'eau vers un barrage pendant les heures creuses. Rendement 90%. Permet le stockage de l'électricité
- Compression de l'air et stockage de l'air comprimé dans un dispositif géologique. Récupération par détente dans une turbine de l'air comprimé. (Rendement 40% qui peut être augmenté par récupération de la chaleur de compression ou en effectuant des compressions isothermes par l'intermédiaire d'un liquide)

Stockage sous forme d'énergie cinétique

Stockage par volant d'inertie (disque lourd) Pour accumuler l'énergie un moteur accélère le disque. L'énergie est récupérée en ralentissant le disque avec un frein/générateur d'électricité. Très utilisé pour régulariser la fourniture d'énergie dans les moteurs thermiques. Développement en cours dans les transports urbains « électriques »

2.3. Le stockage chimique et biologique

- Accumulateurs électrochimiques (batteries, piles). Utilisés à faible échelle. Ils sont chers, à durée de vie limitée et posent des problèmes de pollution en fin de vie.
- Supercondensateurs : condensateurs avec électrolyte conducteur ionique qui permet une haute densité d'énergie stockée et une restitution à haute puissance. En développement
- Carburants dont hydrogène sous forme gaz (grande diffusion à travers les matériaux), liquide (basses températures) ou solide(adsorption). Le vecteur hydrogène peut servir à stocker de l'électricité. Electrolyse pendant la phase de charge et pile à combustible pendant la phase de décharge
- Photosynthèse : Biomasse, biocarburants, huiles, graisses...

2.4. Le stockage thermique

- Stockage par chaleur sensible. Dans ce cas l'énergie stockée dépend essentiellement de la capacité thermique du matériau et de l'élévation de température. L'eau est un très bon matériau « stockeur »
- Stockage par chaleur latente. C'est le changement de phase du matériau qui permet le stockage de la chaleur latente. Le principal avantage est que les transformations se font à température quasi-constante (corps purs et mélanges). Le plus souvent on utilise la transition solide-liquide.

2.5 Récapitulatif du stockage d'énergie

Type	Energie stockée	Puissance	Temps de décharge	Rendement du cycle
Batterie au plomb	chimique	1 kW – 10 MW	Minutes - heures	60%
Batterie Li-ion	chimique	1kW – 100 kW	Minutes - heures	90%
Batterie à circulation	chimique	10 kW – 100 MW	Heures	75%
Pompage hydraulique	mécanique	10 MW – 1000 MW	Heures - jours	75%
Air comprimé Tech. avancée	mécanique	10 MW – 100 MW	Heures	70%
Hydrogène Electrolyse+pile à combustible	chimique	10 kW – 100 MW	Heures -jours	50%
Volant d'inertie	mécanique	1 kW – 1 MW	Secondes - minutes	90%

2.6. La densité de l'énergie stockée

Batterie au plomb	30 kWh/t (batterie complète)
Batterie Li-ion	200 kWh/t (batterie complète)
Batterie à circulation	33 kWh/t (produits chimiques)
Eau pompée à 300m de haut	1 kWh/t (d'eau)
Air comprimé à 100 bar	12 kWh/m ³ (volume du réservoir haute pression)
Volant d'inertie à 300m/s	12 kWh/t
Hydrogène stocké à 300 bars	900 kWh/m ³ (volume du réservoir haute pression)
Eau chauffée à 100°C	116 kWh/t
Refractaire chauffé à 1000°C	600 kWh/m ³ (volume du solide)

Références bibliographiques

Spiegel C., Designing and building fuel cells, 2007, Mc Graw Hill, 1st ed., New York, USA.

Blunier B., Miraoui A., Piles à Combustible : Principes , modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés, 2007, ellipses editions Technosup Génie Energétique, 1st ed., Paris.

Boudellal M., La pile à combustible : Structure. Fonctionnement. Application, 2007, Dunod, 1st ed., Paris, France.

Mannuel d'enseignement des énergies renouvelables, Horizon Fuel Cell.

CDER, Bulletin des énergies renouvelables, pp 22- 23, N°8, Décembre 2005.

URL : http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_008_14.pdf

Rémi SAISSET, Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2 Avril 2004.

Dinh An NGUYEN, Modélisation dynamique du cœur de pile a combustible de type PEM, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Juillet 2010.

URL : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2010_NGUYEN_D_A.pdf

dresses URL:

http://www.cea.fr/jeunes/themes/les_nouvelles_energies/lhydrogene/distribution_et_stockage_de_l_hydrogene.

<http://www.construction-durables.org>

<http://www.energies-renouvelables.org>

<http://www.wikipedia.org>

<http://www.planete-energies.org>

<http://www.connaissancesdesenergies.org>

Evaluations formatives

Test 1

Entourez la bonne réponse : Il existe une seule bonne réponse

N°1 : Les énergies dites fossiles sont :

- A - Recyclables et biodégradables
- B - Polluantes et épuisables
- C - Sans émissions de gaz à effet de serre
- D - Issues de la biodiversité

N°2 : Les énergies dites renouvelables sont :

- A - Inépuisables et très peu polluantes
- B - Trop puissantes
- C - Le charbon, le pétrole et le gaz
- D - Relatives à la présence du CO₂ dans l'air

N°3 : La température de surface du soleil est :

- A - 5700 K
- B - 150 million °C
- C - 2500 °C
- D - 4000 K

N°4 : La puissance du rayonnement solaire direct au niveau de la mer est d'environ :

- A - 1400 W/m²
- B - 2000 W/m²
- C - 1000 W/m²
- D - 350 W/m²

N°5 : On peut produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) à l'aide d'un :

- A - Biodigesteur
- B - Panneau photovoltaïque
- C - Batterie acide
- D - Chauffe eau solaire

N°6 : La géothermie profonde (~2000m) peut garantir des températures entre :

- A - 15 – 20 °C
- B - 50 – 95°C
- C - 5 – 10°C
- D - Jusqu'à 40°C

N°7 : Le soleil est la source indirecte pour d'autres sources d'énergies renouvelables qui sont :

- A - Le vent, l'eau et la biomasse
- B - Biogaz, biocarburant
- C - Géothermie, marée motrice
- D - Panneau Photovoltaïque, CE solaire

N°8 : Le rendement d'un panneau photovoltaïque est de l'ordre de :

- A - 18 %
- B - 2%
- C - 35%
- D - 12%

N°9 : La puissance d'une éolienne tient compte de:

- A - La vitesse du vent et la hauteur du mât
- B - L'énergie chimique du vent
- C - L'énergie solaire
- D - Le nombre des pâles

N°10 : L'énergie solaire, hydraulique et éolienne peuvent être stocké :

- A - A court terme
- B - A moyen terme
- C - A long terme
- D - Pas de stockage possible

N°11 : La pile à combustible réversible peut être utilisée comme un électrolyseur :

- A - Vrai
- B - Faux

N°12 : La production d'électricité géothermique utilise des turboalternateurs

- A - Vrai
- B - Faux

N°13 : L'équivalent en énergie de 1 m³ de biogaz est inférieur à 1 kg de bois :

- A - Vrai
- B - Faux

N°14 : A l'aide d'un digesteur anaérobique (méthaniseur), on produit les biocarburants :

- A - Vrai
- B - Faux

N°15 : Un aérogénérateur sert au pompage de l'eau:

- A - Vrai
- B - Faux

Test 2

Entourez la bonne réponse : Il existe une seule bonne réponse

N°1 : Les énergies dites fossiles sont :

- A - Recyclables et biodégradables
- B - Polluantes et épuisables
- C - Sans émissions de gaz à effet de serre
- D - Issues de la biodiversité

N°2 : Les énergies dites renouvelables sont :

- A - Inépuisables et très peu polluantes
- B - Trop puissantes
- C - Le charbon, le pétrole et le gaz
- D - Relatives à la présence du CO₂ dans l'air

N°3 : La température de surface du soleil est :

- A - 5700 K
- B - 150 million °C
- C - 2500 °C
- D - 4000 K

N°4 : La distance soleil – terre est d'environ :

- A - 150 million de km
- B - 15000 miles
- C - 1,2 année lumière
- D - 60 000 km

N°5 : La puissance du rayonnement solaire direct au niveau de la mer est d'environ :

- A - 1400 W/m²
- B - 2000 W/m²
- C - 1000 W/m²
- D - 350 W/m²

N°6 : L'albédo est :

- A - La quantité d'énergie solaire réfléchi
- B - La quantité d'énergie solaire absorbée
- C - La quantité d'énergie solaire utile
- D - Un métal utilisé dans le panneau solaire

N°7 : On peut produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) à l'aide d'un :

- A - Biodigesteur
- B - Panneau photovoltaïque
- C - Batterie acide
- D - Chauffe eau solaire

N°8 : La géothermie profonde (~2000m) peut garantir des températures entre :

- A - 15 – 20 °C
- B - 50 – 95°C
- C - 5 – 10°C
- D - Jusqu'à 40°C

N°9 : Le soleil est la source indirecte pour d'autres sources d'énergies renouvelables qui sont :

- A - Le vent, l'eau et la biomasse
- B - Biogaz, biocarburant

C - Géothermie, marée motrice

D - Panneau Photovoltaïque, chauffe eau solaire

N°10 : Le rendement d'un panneau photovoltaïque est de l'ordre de :

- A - 18 %
- B - 2%
- C - 35%
- D - 12%

N°11 : La puissance d'une éolienne tient compte de:

- A - La vitesse du vent et la hauteur du mât
- B - L'énergie chimique du vent
- C - L'énergie solaire
- D - Le nombre des pâles

N°12 : L'énergie hydraulique tient compte de :

- A - L'énergie chimique de l'eau
- B - La température de l'eau
- C - La vitesse de déplacement de l'eau
- D - Le type de la turbine hydraulique

N°13 : Le stockage d'énergie peut se faire à travers des vecteurs énergétique comme :

- A - L'hydrogène
- B - Le volant d'inertie
- C - Les biocarburants
- D - La pile à combustible

N°14 : Le stockage d'énergie peut se faire à travers des vecteurs énergétique comme :

- A - L'hydrogène
- B - Le volant d'inertie
- C - Les biocarburants
- D - La pile à combustible

N°15 : L'énergie solaire, hydraulique et éolienne peuvent être stocké :

- A - A court terme
- B - A moyen terme
- C - A long terme
- D - Pas de stockage possible

N°16 : Les batteries et les piles font partie du stockage :

- A - Sous forme d'énergie potentielle
- B - Sous forme d'énergie potentielle
- C - Accumulateurs électrochimiques
- D - Super condensateurs

N°17 : La compression et le stockage de l'air comprimé dans un dispositif géologique fait partie du stockage :

- A - Sous forme d'énergie potentielle
- B - Sous forme d'énergie potentielle
- C - Accumulateurs électrochimiques
- D - Super condensateurs

N°18 : Le stockage par chaleur sensible et chaleur latente fait partie du :

- A - Stockage chimique
- B - Stockage thermique
- C - Stockage biologique
- D - Stockage physique

N°19 : Le volant d'inertie est un dispositif géologique fait partie du stockage :

- A - Sous forme d'énergie potentielle
- B - Sous forme d'énergie potentielle
- C - Accumulateurs électrochimiques
- D - Super condensateurs

N°20 : La densité d'énergie de l'hydrogène à 300 bars est :

- A - 200 kWh/m³
- B - 30 kWh/m³
- C - 900 kWh/m³
- D - 600 kWh/m³

N°21 : La pile à combustible réversible peut être utilisée comme un électrolyseur :

- A - Vrai
- B - Faux

N°22 : La production d'électricité géothermique utilise des turboalternateurs

- A - Vrai
- B - Faux

N°23 : La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol :

- A - Vrai
- B - Faux

N°24 : L'hydrogène est un moyen de stockage d'énergie sous sa forme chimique :

- A - Vrai
- B - Faux

N°25 : L'équivalent en énergie de 1 m³ de biogaz est inférieur à 1 kg de bois :

- A - Vrai
- B - Faux

N°26 : A l'aide d'un digesteur anaérobique (méthaniseur), on produit les biocarburants :

- A - Vrai
- B - Faux

N°27 : Un panneau solaire thermique utilise les photons (la lumière) pour chauffer l'eau :

- A - Vrai
- B - Faux

N°28 : Un panneau solaire photovoltaïque utilise les rayons infrarouges :

- A - Vrai
- B - Faux

N°29 : Un aérogénérateur sert au pompage de l'eau:

- A - Vrai
- B - Faux

N°30 : un aérogénérateur ne produit aucun aspect de pollution :

- A - Vrai
- B - Faux

Test 3

Entourez la bonne réponse : Il existe une seule bonne réponse

N°1 : Les sources des énergies dites fossiles sont :

- A - Pétrole, gaz et charbon
- B - Polluantes et épuisables
- C - Sans émissions de gaz à effet de serre
- D - Issues de la biodiversité

N°2 : Les sources des énergies dites renouvelables sont :

- A - Inépuisables et très peu polluantes
- B - Trop puissantes
- C - Le charbon, le pétrole et le gaz
- D - Soleil, vent, eau, géothermie et biomasse.

N°3 : La température de surface du soleil est supérieure à :

- A - 5000 K
- B - 6000 K
- C - 7000 K
- D - 8000 K

N°4 : La distance soleil – terre est d'environ :

- A - 150 million de km
- B - 15000 miles
- C - 1,2 année lumière
- D - 60 000 km

N°5 : L'albédo est :

- A - La quantité d'énergie solaire réfléchi
- B - La quantité d'énergie solaire absorbée
- C - La quantité d'énergie solaire utile
- D - Un métal utilisé dans le panneau solaire

N°6 : Que veut dire l'abréviation (ECS) :

- A - Equipement à Capacité Solaire
- B - Enduit Contre Sol
- C - Eau Chaude Sanitaire
- D - Encadrement, Cuivre et Soleil

N°7 : Le soleil est la source indirecte pour d'autres sources d'énergies renouvelables qui sont :

- A - Le vent, l'eau et la biomasse
- B - Biogaz, biocarburant
- C - Géothermie, marée motrice
- D - Panneau Photovoltaïque, chauffe eau solaire

N°8 : Le rendement optimal d'un panneau photovoltaïque ne dépassera pas :

- A - 18 %
- B - 22%
- C - 35%
- D - 12%

N°9 : La puissance d'une éolienne tient compte de:

- A - La vitesse du vent et la hauteur du mât
- B - L'énergie chimique du vent
- C - L'énergie solaire
- D - Le nombre des pâles

N°10 : L'énergie hydraulique tient compte de :

- A - L'énergie chimique de l'eau
- B - La température de l'eau
- C - La vitesse de déplacement de l'eau
- D - Le type de la turbine hydraulique

N°11 : La pile à combustible réversible ne peut pas être utilisée comme un électrolyseur :

- A - Vrai
- B - Faux

N°12 : La production d'électricité géothermique utilise des turboalternateurs

- A - Vrai
- B - Faux

N°13 : La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol :

- A - Vrai
- B - Faux

N°14 : L'hydrogène est un moyen de stockage d'énergie sous sa forme chimique :

- A - Vrai
- B - Faux

N°15 : L'équivalent en énergie de 1 m³ de biogaz est inférieur à 1 kg de bois :

- A - Vrai
- B - Faux

N°16 : A l'aide d'un digesteur anaérobie (méthaniseur), on produit les biocarburants :

- A - Vrai
- B - Faux

N°17 : Un panneau solaire thermique utilise les photons (la lumière) pour chauffer l'eau :

- A - Vrai
- B - Faux

N°18 : Un panneau solaire photovoltaïque utilise les rayons infrarouges :

- A - Vrai
- B - Faux

Test 4

Répondez aux questions suivantes sur la feuille de réponse

1. Citez trois sources d'énergies renouvelables.
2. Citez deux applications pour l'énergie solaire.
3. Un aérogénérateur (éolienne) produit une seule sorte de pollution, laquelle ?
4. Le rendement optimal d'un panneau photovoltaïque est de l'ordre de combien ? La puissance d'une éolienne dépend essentiellement de deux paramètres, lesquelles ? Les turbines hydrauliques tiennent compte de quel paramètre ?
5. Citez un convertisseur électrochimique qui utilise l'hydrogène pour le transformer en électricité, chaleur et eau.
6. Le digesteur anaérobique utilise les déchets organiques pour produire quel sorte d'énergie ?
7. Citez trois (03) manières pour stocker l'énergie.
8. Que signifie les termes abrégés suivantes :
 - ECS,
 - Albédo,
 - Electrolyseur,
 - Geysier,
 - Volant d'inertie.

Test 5

Mettez vos réponses sur la double feuille de l'examen

1. Combien peut-on avoir de type de panneaux photovoltaïques ? Donnez une classification selon le type de matériau utilisé ?
2. La puissance d'une éolienne dépend essentiellement de deux paramètres, lesquelles ?
3. Citez un convertisseur électrochimique qui utilise l'hydrogène pour le transformer en électricité, chaleur et eau..
4. Les déchets organiques produisent quelle sorte d'énergie ? et par quel moyen ?
5. Citez trois (03) manières pour stocker l'énergie.
6. Comment appelle-t-on la source d'énergie renouvelable provenant de la chaleur de la terre ? Citez Trois Applications.

7. Application :

Une maison pour un jeune couple aura besoin de 4000 kWh/an pour couvrir ses besoins en électricité. Veuillez donner un ordre de grandeur pour l'éventuelle installation photovoltaïque (Puissance à installer, Eléments de l'installation, surface nécessaire).