

Presque tout sur les éoliennes

et un petit peu sur les panneaux photovoltaïques

Jacques Deferne



Avant propos

Le développement des parcs éoliens est encouragé par une partie des autorités politiques et contesté par une partie de la population, surtout par les habitants sur les territoires desquels on cherche à les implanter.

Il est évident que nous sommes actuellement dans une période de réchauffement climatique, comme la Terre en a déjà vécue dans le passé. A l'heure où le dogme des écologistes consiste à affirmer que la production de CO₂ en est la cause et que le péché originel de l'Homme est l'usage inconsidéré de combustibles fossiles, il paraît logique de chercher des sources d'énergie non polluantes.

Mais comment les éoliennes s'intègrent-elles, non seulement dans le paysage, mais aussi de façon peuvent elles participer à l'approvisionnement en électricité en s'insérant parmi les autres sources plus conventionnelles ?

Ce sujet est délicat, car au sein de la communauté humaine, les antagonismes sont souvent violents, voire même irréconciliables. Il est donc difficile de ne pas entrer dans les polémiques qu'elles suscitent, mais je vais tout de même essayer d'y échapper.

Les citoyens suisses sont appelés à se prononcer par voie de référendum ou d'initiative sur ces sujets hautement polémiques que sont les énergies renouvelables, les centrales nucléaires ou encore la politique énergétique du futur. La plupart des citoyens n'ont pas de références scientifiques suffisantes pour se prononcer rationnellement sur ces sujets délicats qui engagent leur avenir et surtout celui de leurs enfants. Ce sont les lobbies qui influencent leur décision, lobbies liés et rémunérés par les tenants des centrales nucléaires, par les constructeurs d'éoliennes, par les distributeurs d'électricité ou encore par des groupes passionnés d'écologie.

En écrivant cet essai, je vais tenter d'expliquer ce que sont les éoliennes, comment on les construit, quels avantages elles peuvent apporter à nos besoins énergétiques, quels sont les inconvénients liés à la nature aléatoire de leur fonctionnement, combien coûtent-elles et quel sera finalement le coût de l'électricité qu'elles délivreront ?

Ce texte complète ceux que j'ai consacrés à l'énergie, à la pollution et au climat. Cela concerne tout notre environnement et l'impact qu'entraîne l'explosion démographique de l'espèce humaine sur notre planète.

Jacques Deferne

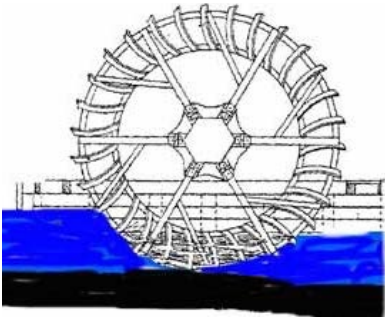
L'Homme a besoin d'énergie

Dès l'Antiquité, l'homme a cherché à exploiter l'énergie des cours d'eau et du vent. Cette énergie était utilisée pour moudre les céréales, extraire l'huile des plantes oléagineuses, scier le bois, pomper l'eau ou faire tourner diverses machines.

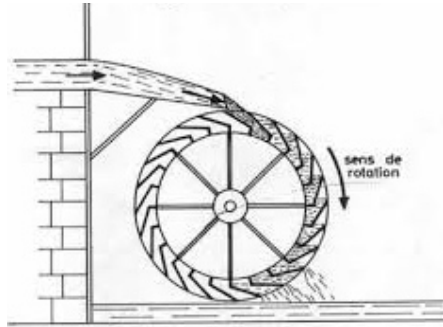
Dans les régions bien arrosées et à relief marqué, l'énergie hydraulique a été privilégiée, dans les régions sans relief mais où le vent souffle sans obstacle, ce sont les moulins à vent qui ont été développés.

Le moulin à eau utilise deux techniques :

- **Une roue à aubes** disposée au-dessus d'un bief, entraînée par le courant;
- En ce qui concerne la **roue à godets**, l'eau arrive par dessus une grande roue munie de godets dont le poids, une fois remplis d'eau, entraîne la rotation de la roue.



Roue à aubes



Roue à godets



Roue à aubes

Moulin Saint Pierre des Taillades, situé près de Cavaillon (Vaucluse).



Roue à godets,

Moulin des Desniers à Charbonnières les Vieilles - Puy de Dôme. (Photo FFAM).

Les moulins à eau à Genève

Vers 1840 on comptait, en territoire genevois, une quarantaine d'installations hydrauliques, roues à aubes ou à godets, vingt et une sur le Rhône, dix sur l'Arve, sept sur la Drize, deux sur la Seymaz et deux sur l'Hermance. La plupart de ces installations étaient dévolues à la mouture des céréales, quelques unes broyaient les écorces.



Moulin de Vernier, 1880



Moulin Pelaz à la Coulouvrenière en 1875

Souvent, les Autorités faisaient payer un droit d'utilisation de l'eau destinée aux moulins. Ce droit est encore appliqué de nos jours par le biais des redevances que reçoivent les communes dont on prélève l'eau pour alimenter les barrages hydroélectriques.

Les moulins à vent

Dans le Nord de l'Europe où le relief est insuffisant pour développer des moulins à eau mais où le régime des vents est favorable, on a développé les moulins à vent. Ce sont donc au voisinage des côtes maritimes du nord de l'Europe, là où le régime des vents est constant que les moulins à vent sont apparus dès le haut moyen-âge. Leur implantation a beaucoup aidé les paysans à se libérer des tâches pénibles.



Moulin à vent de Vrines à Sainte-Radegonde (photo Père Igor)

On a longtemps accordé une certaine préférence aux moulins à eau car ils étaient d'un usage plus aisé que les moulins à vent. En effet, si le débit d'une rivière peut fluctuer avec la saison, l'installation d'une dérivation permet de stabiliser l'alimentation de la roue et la force du courant est disponible en permanence.

Les moulins à vent sont dépendants de la force et de l'orientation du vent. Il faut donc constamment orienter l'axe de l'hélice et imaginer des systèmes de réduction de la voilure lorsque le vent devient trop fort. Les syndicats critiquent à juste titre le principe le travail sur appel des patrons mais les meuniers ont été les premiers travailleurs sur appel, le patronat étant ici les caprices du vent !

Par ailleurs, l'utilisation du vent a toujours été libre, contrairement à l'utilisation de l'eau qui était taxée. Les éoliennes sont donc les versions modernes des anciens moulins à vent.

Fonctionnement d'une éolienne



Avant toutes choses, il faut préciser quelques notions de physique nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'une éolienne.

Force, énergie, travail

Il faut préciser le rapport qu'il y a entre ces notions qui se ressemblent mais qui ont des significations différentes.

- **La Force** est définie par les physiciens comme une action mécanique capable de créer une accélération, c'est-à-dire pouvoir modifier la vitesse d'un objet. L'unité de force est le **Newton [N]**. C'est la force nécessaire pour modifier la vitesse horizontale d'une masse de 1 kilo, de 1 mètre seconde, chaque seconde.

$$1 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \times \text{m}}{\text{s}^2}$$

Pratiquement, on connaît mieux le kilogramme-force [kgf] qui est l'unité dont se sert votre épiciers pour vous compter la quantité de pommes-de-terre qu'il vous vend.

Le kilogramme-force est la force exercée par une masse de 1 kg dans le champ de gravité terrestre et qui vaut 9.81 N. Lorsqu'on parle du poids d'un homme de 70 kg, il s'agit en fait de la force qu'il exerce sur le sol, exprimée en kgf. On pourrait changer d'unité et dire qu'il exerce sur le sol une force de 686.7 Newton !

Unité de force : Newton [N]

C'est la force nécessaire pour **modifier** la vitesse d'une masse de 1 kilo de 1 mètre seconde par seconde.

On voit que l'application d'une force provoque une variation de vitesse, donc une **accélération** !

- **Le Travail** est produit par la force lorsque son point d'application se déplace. L'unité de travail est le joule [J]. Elle est identique à celle de l'énergie.

Unité de travail : Joule [J]

C'est donc l'énergie nécessaire pour **communiquer** à une masse d'un kilo une vitesse de un mètre par seconde.

- **L'Energie** semble, à première vue, être intimement liée au travail. Il est difficile de saisir la différence entre ces deux notions qui utilisent toutes deux la même unité. On pourrait dire que l'énergie c'est le potentiel qui peut produire un travail. Au moment où le travail s'effectue, l'énergie disparaît, ou du moins se transforme et permet alors d'effectuer un travail.

Comment l'énergie est-elle véhiculée par le vent ?

Une masse du vent animée d'un mouvement rectiligne renferme une énergie sous forme cinétique. On l'exprime par la relation bien connue :

$$E_c = \frac{1}{2} M V^2 \quad \text{où } M \text{ est la masse du vent et } V \text{ sa vitesse.}$$

Or la masse instantanée du vent qui traverse la surface balayée par les pales d'une éolienne vaut :

$$M = A \rho V \quad \text{où } A \text{ est la surface balayée par les pales, } \rho \text{ la densité de l'air et } V \text{ sa vitesse.}$$

La puissance théorique qu'une éolienne pourrait retirer de l'action du vent est donc :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} A \rho V^3$$

Cette puissance n'est que théorique car, pour la récupérer, il faudrait que la vitesse du vent soit nulle après son passage à travers les pales de l'éolienne, ce qui n'est évidemment pas possible. L'éolienne se contente donc de ralentir le vent.

Mais Albert Betz s'en mêle

Un thermodynamicien allemand, Albert Betz, a été un pionnier dans l'étude de l'énergie éolienne. Son ouvrage "Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen" (L'énergie éolienne et son exploitation dans les moulins à vent), publié en 1926 fait le point sur les connaissances théoriques des éoliennes à cette époque.

Il démontre, en 1909, que la puissance théorique maximum qu'une éolienne peut retirer de la puissance du vent ne peut dépasser 16/27 de la puissance cinétique théorique du vent qui la traverse. Sa démonstration est basée sur les équations classiques de la mécanique des fluides établie par Daniel Bernoulli en 1738 et Leonhard Euler en 1755.

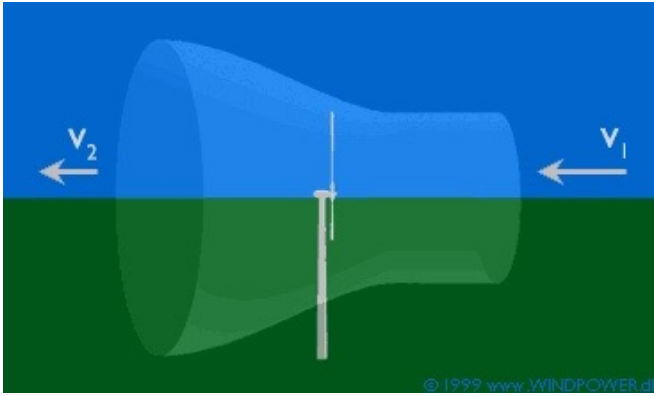
Cette puissance maximum est atteinte lorsque la vitesse du vent à l'arrière de l'éolienne n'est plus que le tiers de la vitesse du vent reçu par le système. Dès lors, la puissance théorique maximum récupérée par une éolienne n'est plus que :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \times \frac{16}{27} A \rho V^3 \quad \text{soit}$$

$$P_{\max} = 0.37 A \rho V^3$$



Albert Betz (1885-1968)



Une éolienne freine le vent. La vitesse du vent diminue en aval du rotor mais comme la masse d'air balayée par le rotor est égale en amont et en aval, la veine d'air s'élargit, causant un remous à l'arrière du système.

Condensation de l'air

En examinant le schéma ci-dessus on voit que le flux d'air s'élargit à l'arrière de l'éolienne. Sa pression et sa température diminuent légèrement. Si l'air est saturé d'humidité, en mer par exemple, et proche du point de rosée¹, le passage du vent à travers les pales de l'éolienne, provoque parfois la formation d'un nuage. Cela contribue alors à l'augmentation de la couverture nuageuse.



Formation de nuages à l'arrière des éoliennes

Puissance électrique nominale

C'est la puissance électrique maximale que peut produire une éolienne lorsque les conditions de vent sont favorables. Cette puissance est atteinte lorsque la vitesse du vent est d'environ 15 m/s soit 55 km/h. En deçà de cette vitesse du vent, la production électrique est moindre. Au delà de 25 m/s (90 km/h), l'éolienne doit être arrêtée par les pales risqueraient de heurter le mât.

¹ voir du même auteur "L'hygrométrie et les instruments de musique"

Le facteur de charge

C'est le rapport entre l'énergie effectivement produite par une éolienne pendant une période donnée et l'énergie qu'elle aurait pu produire si elle avait fonctionné à sa puissance nominale pendant toute cette même période.

Evidemment, ce facteur dépend du régime du vent et de la demande effective des distributeurs d'électricité. Il s'exprime en pour-cent (%) et il est généralement calculé sur une période d'une année. En moyenne, en Europe, le facteur de charge varie entre 18% % et 24 %. Il est un plus élevé pour les éoliennes offshore installées dans la mer du Nord et atteint parfois 30%.

$$\text{Facteur de charge} = \frac{\text{énergie effectivement produite}}{\text{énergie qui aurait pu être produite si l'éolienne avait fonctionné en permanence}}$$

Eoliennes actuelles

Aujourd'hui, les éoliennes qui sont construites dans notre environnement sont toutes du type « à axe horizontal », c'est à dire un très haut mât qui supporte une grande hélice à trois pales orientée face au vent. En augmentant la hauteur du mât et le diamètre balayé par les pales on peut obtenir d'assez grandes puissances.

Par exemple, l'éolienne WT-3.6-107 de Siemens est constituée d'un mât conique en acier haut de 90 mètres, pesant 255 tonnes, supportant une nacelle de 125 t.

Le rotor est constitué de 3 pales de 52 m. de long chacune, pesant en tout 92 tonnes. Ce rotor balaye une surface 9'000 m² pour un diamètre de 107 m.

Sa vitesse de rotation est comprise entre 5 et 13 tours/minute suivant la vitesse du vent. La puissance maximum que peut produire la génératrice dans des conditions optimales de vent est de 3'400 kW pour un courant compris entre 750 et 690 volts.



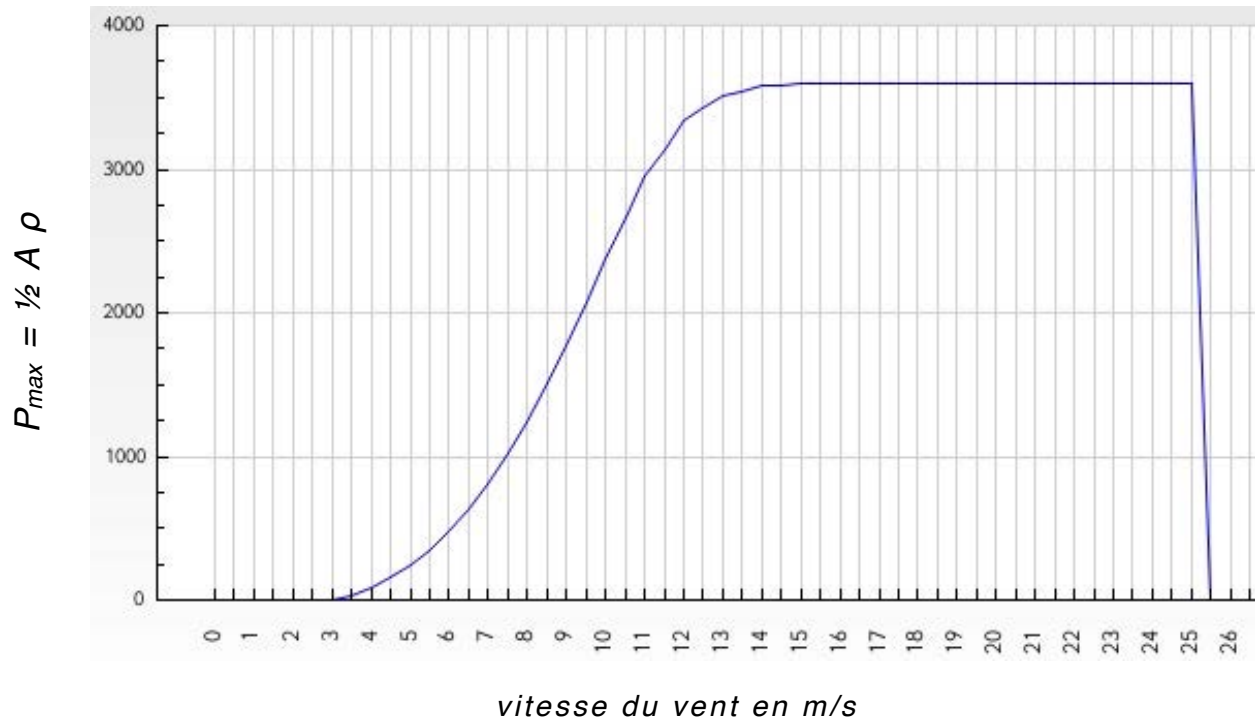
Eolienne à axe horizontal

Rendement en fonction du vent

Cette éolienne commence à tourner à partir d'une vitesse de vent de 3 m/s. A 7m/s elle développe une puissance de 1'000 kW. Sa puissance maximum est atteinte lorsque la vitesse du vent dépasse 15 m/s (55 km/h). Au delà de 25 m/s (90 km/h), les contraintes mécaniques deviennent excessives et fragilisent l'ensemble de l'installation. Cela nécessite la mise en drapeau des pales et l'arrêt de l'éolienne.

Le graphique ci-dessous montre la puissance que cette éolienne peut développer en fonction de la vitesse du vent.

Puissance développée en fonction de la vitesse du vent



Encore plus grandes

La tendance actuelle est à la construction d'éoliennes de plus en plus puissantes. L'éolienne baptisée « Haliade » possède un rotor de 150 m. de diamètre montée au sommet d'un mât de 100 m. elle est située au large de l'estuaire de la Loire et pourra développer une puissance maximum de 6'000 kW.

L'éolienne géante « Haliade », au large de l'estuaire de la Loire



Nacelle



Gigantisme des pales

Hauteur de la nacelle	100 m.
Poids de la nacelle	365 t.
Longueur d'une pale	74.5 m.
Poids d'une pale	28 t.
Poids du tube	340 t.
Poids de l'embase	375 t.
Puissance max.	6'000 kW

Variations sur le thème de l'éolienne

Alors, aujourd'hui, que la plupart des éoliennes sont de type "à axe horizontal", il existe aussi des éoliennes à "axe vertical". C'est un ingénieur finlandais, Sigurd Savonius qui l'a préconisée en 1924. A l'origine il s'agissait de godets hémisphériques montés sur un axe vertical.

Ce système a été perfectionné ensuite par le français Georges Darrieus qui a remplacé les godets par des ailettes en forme de vrille. Ces éoliennes présentent quelques avantages mais aussi pas mal d'inconvénients :

Eoliennes à axe vertical



Eolienne de
type Savonius



Eolienne type Darrieus

Avantages et inconvénients

La direction du vent n'a aucune influence sur le fonctionnement des éoliennes. Elles fonctionnent déjà avec un vent faible et résistent aux vents violents. Elles sont moins bruyantes que les éoliennes à axe horizontal. Le générateur situé à la base du mât est facilement accessible

Mais leur rendement est nettement inférieur aux éoliennes à axe horizontal et il est difficile d'en construire de grande taille. La plus grande jamais construite se trouve au Canada, à proximité de la petite ville de Cap-Chat, au bord du Saint-Laurent. Sa hauteur est de 110 mètres de haut et la puissance du générateur pouvait atteindre 4'000 kW. Mais elle était si lourde qu'il fallait un moteur auxiliaire pour la mettre en rotation. Les roulements à bille de la base de l'axe n'ont pas supporté ni le poids de l'axe ni les vibrations et ont été complètement détériorés. Cette éolienne a été abandonnée à la suite d'un coup de vent imprévisible.



Eolienne de Cap-Chat, Canada
hauteur : 110 mètres

Mini-éoliennes

On trouve des mini-éoliennes pour des usages domestiques bien particuliers. Leur puissance va de quelques dizaines à quelques centaines de watt. Elles contribuent à recharger des batteries dans des lieux éloignés de toutes sources d'électricité. Les bateaux de plaisance en sont souvent équipés.

Variation sur le thème des éoliennes



Petite éolienne à nombreuses pales destinée à pomper l'eau



Petite éolienne destinée à la recharge de batteries sur un bateau de plaisance



Petites éoliennes pour un usage domestique à placer sur un toit

Emplacement d'une éolienne

Comme l'aurait imaginé Monsieur Jourdain, il est nécessaire d'installer une éolienne là où il y a du vent. Il faut un vent régulier dont la vitesse optimale se situe le plus souvent possible entre 30 et 80 km/h. Il est souhaitable que sa direction soit la plus constante possible pour éviter de devoir orienter trop fréquemment l'axe de l'hélice qui doit être maintenu parallèle à la direction du vent.

Il faut aussi tenir compte des obstacles naturels qui peuvent engendrer des turbulences dans le régime local du vent.

C'est donc après consultation des cartes des mesures de la vitesse et de l'orientation du vent (lorsqu'elles existent) et après des mesures sur place des caractéristiques du vent pendant au moins une année qu'il est possible de sélectionner un site favorable à l'implantation d'une éolienne ou d'un champ d'éoliennes.

Il faut aussi que cet emplacement soit facilement accessible par les énormes convois chargés d'acheminer le matériel sur place et qu'il soit à proximité de stations électriques qui permettent une connexion au réseau.

L'acquisition des terrains pour l'implantation d'une éolienne est problématique car il faut tenir compte de la proximité des habitations et de l'agrément des riverains.

Autres contraintes

Une éolienne entraîne aussi un certain nombre d'inconvénients :

- le bruit constant qu'engendre la rotation de cette hélice géante, en particuliers les basses fréquences aurait un impact direct sur la santé des riverains. Le législateur doit donc imposer une distance minimum entre une éolienne et les habitations.*
 - les éoliennes peuvent parfois présenter un effet dévastateur sur les oiseaux en particulier, la nuit, sur les chauve-souris.*
 - l'aspect visuel d'un groupe d'éoliennes modifie complètement l'aspect d'un paysage.*
 - l'ensemble de ces inconvénients entraîne une moins value importante et durable du patrimoine immobilier des riverains.*
-

Construction d'une éolienne

Fondations de base

Les fondations nécessaires à l'implantation d'une éolienne occupent une surface comprise entre 200 et 300 m² sur une profondeur de plusieurs mètres. Il faut environ 60 tonnes d'acier pour le ferrailage et jusqu'à 600 m³ de béton, soit environ 1'400 tonnes.

Sur ces fondation il faut ancrer solidement dans le béton la **virole d'ancrage**, cette pièce circulaire métallique hérissée de tiges filetées sur son pourtour sur lesquelles sera fixée la première section du mât de l'éolienne.



Partie supérieure de la virole prête à recevoir la première section du mât.

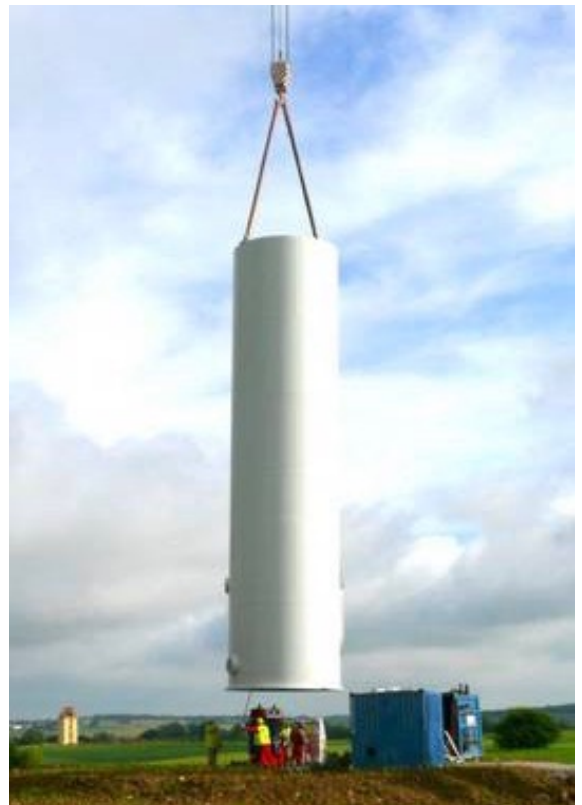


Le ferrailage des fondations est important. Il assure la cohésion de la masse de béton qui sera coulée et l'ancrage de la virole au centre.

Mât

Le mât est un tube faiblement conique, le plus souvent en acier, parfois en béton. Sa hauteur doit être un peu supérieure au diamètre des pales afin que celles-ci soient à l'abri des perturbations dues au relief immédiat. Sa hauteur dépasse largement 100 mètres pour les plus grandes éoliennes. Le diamètre à la base peut dépasser 5 mètres. Ce mât est constitué de trois ou quatre sections qui sont assemblées sur place.

L'intérieur du mât abrite les câbles de commande et de connexion du courant, un système d'échelles pour accéder au sommet, voire même un ascenseur pour les plus grandes éoliennes. Au pied du mât se trouve un transformateur qui convertit le courant produit par la turbine dans la tension compatible avec celle du réseau.



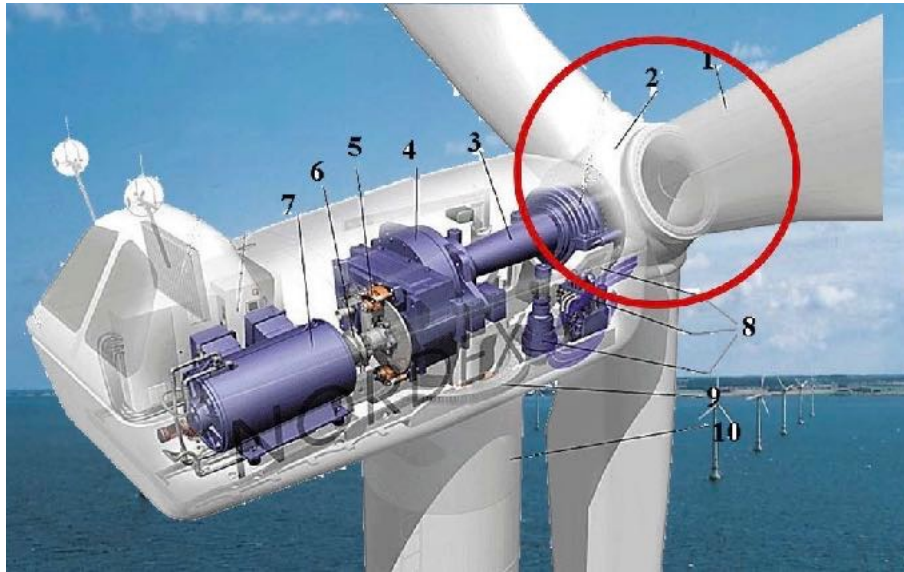
Pose de la première section du mât.

La nacelle

La nacelle est le cœur vital de l'éolienne. C'est une lourde bâti qui supporte le rotor et tout le système mécanique et électrique nécessaire au bon fonctionnement de l'éolienne.

Cette nacelle peut peser plusieurs centaines de tonnes. Les éléments qui la constituent sont :

Schéma d'une nacelle (modèle NORDEX 1000)



- | | |
|-------------------|--------------------------|
| 1. pales du rotor | 6. arbre rapide |
| 2. moyeu | 7. génératrice |
| 3. arbre lent | 8. système de commande |
| 4. multiplicateur | 9. système d'orientation |
| 5. frein à disque | 10. mât |

Le rotor

Le rotor est une gigantesque hélice à trois pales orientables. Elles sont le plus souvent en fibre de verre et en fibre de carbone. Une pale peut atteindre 70 m. de longueur et peser jusqu'à près de 30 tonnes. Elles ont le profil d'une aile d'avion, arrondi sur le bord d'attaque, plat sur le bord de fuite. Elles sont faiblement vrillées, ce qui signifie que leur incidence par rapport au vent varie du centre vers l'extrémité. En tournant à une vitesse comprise entre 12 et 20 tours/minute, la vitesse de l'extrémité d'une pale peut dépasser 500 km/h ! La force centrifuge qui s'exerce sur les pales en rotation nécessite un solide arrimage sur le moyeu.



Transport d'une pale d'éolienne

Le rotor en mouvement est comparable à un gyroscope qui s'oppose à tout changement d'orientation. Or, il faut constamment maintenir le rotor face au vent. Un système mécanique automatique entraîne le changement d'orientation de la nacelle afin que le rotor reste toujours bien orienté face au vent. Cet effet gyroscopique est important et chaque changement d'orientation du rotor induit de puissantes contraintes mécaniques sur les pales et le moyeu qui les supporte.

Le moyeu

Le moyeu supporte les pales du rotor. Il est soumis à toutes les contraintes mécaniques exercées par le rotor. C'est une pièce d'acier solide et massive. Il est solidaire de l'axe de rotation appelé "arbre lent", dont la vitesse de rotation, qui correspond à celle du rotor, est comprise entre 15 et 30 tours/minute. Il comprend aussi le système qui permet de faire varier le pas des pales en fonction de la force du vent. Un puissant système de freinage à disque est installé sur l'axe du rotor qui permet de l'arrêter lorsque le vent devient trop tempétueux.



Moyeu sur lequel les pales ont sont fixées

Le multiplicateur

Le multiplicateur est un système d'engrenages, analogue à celui d'une boîte de vitesse d'automobile, permet de communiquer à un arbre secondaire, l'**arbre rapide**, une vitesse de rotation de l'ordre de 1'000 à 2'000 tours/minute, vitesse nécessaire pour le bon fonctionnement du générateur électrique. Il est généralement monté sur des supports souples qui absorbent les vibrations engendrées par la rotation de l'hélice. Les engrenages sont lubrifiés par circulation forcée d'huile ou par barbotage dans un bain d'huile.



Multiplicateur et son schéma de fonctionnement

Le générateur électrique

Le générateur est le plus souvent un alternateur dont le rotor est constitué d'aimants permanents. En tournant, le rotor induit un courant alternatif dans le stator qui l'entoure. Un système de régulation complexe est rendu nécessaire à cause des variations de vitesse du rotor.

La tension électrique délivrée par l'alternateur se situe aux alentours de 690 volts. Elle est transmise à un transformateur situé à la base du mât qui élève la tension à 20'000 volts, tension qui peut être alors injectée dans le réseau électrique.



Alternateur d'éolienne, puissance 5'000 kW

Contrôle et entretien

Tous ces organes mécaniques sont soumis à de fortes contraintes et subissent un échauffement notable. Il faut donc assurer la lubrification de tous les organes en mouvement et un système de refroidissement qui empêche l'huile de surchauffer. En particulier, il faut inspecter régulièrement le multiplicateur qui est soumis à de grosses contraintes et changer les pièces trop usées.

Sur le sommet de la nacelle on trouve une girouette et un anémomètre qui contrôlent en permanence la force et la direction du vent. C'est à partir des indications fournies par ces instruments que l'orientation de la nacelle et les dispositifs d'arrêt du rotor sont contrôlés.

Les éoliennes en mer

Il est tentant de construire des champs d'éoliennes en pleine mer (offshore), mais toujours sur le plateau continental. En effet, les vents y sont plus réguliers et il n'y a pas de contestations avec les voisins.

Toutefois le problème des fondations est plus difficile à résoudre et la salinité des embruns provoque une corrosion importantes de toutes les pièces métalliques. Elles nécessitent aussi la pose de câbles sous-marins pour l'acheminement de l'électricité jusqu'à la terre ferme.

Elles diffèrent des éoliennes terrestres par leurs fondations. Les ingénieurs ont développés plusieurs systèmes de fondation qui diffèrent par leur technique. ils proposent :

- La fondation gravitaire qui est une masse de béton armé de plus de 1'000 tonnes déposé sur le fond marin et sur laquelle vient se fixer l'éolienne. Une technique innovante consiste à construire une lourde structure conique en béton armé (près de 2'000 tonnes), surmontée d'une courte partie cylindrique. L'intérieur est creux ce qui lui assure une certaine flottabilité. Remorqué jusqu'à son emplacement prévu, les ballasts sont vidés et la structure s'enfonce et se pose sur le fond marin. Le réservoir peut encore être lesté, ce qui lui confère une stabilité encore plus grande.

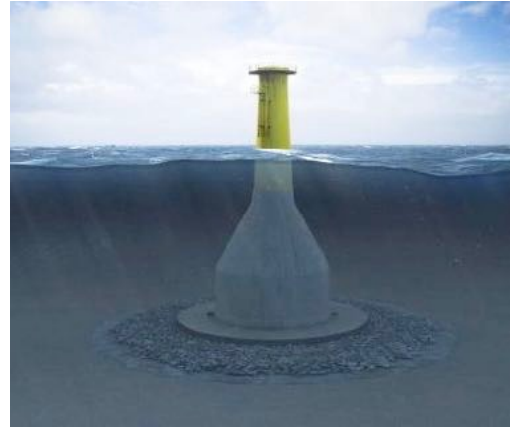


Eoliennes offshore mer du nord

- La fondation monopieu, est un pieu métallique d'environ 5 mètres de diamètre qui est enfoncé dans le fond marin.
- La fondation en treillis tubulaire, dit type jacket, déjà longuement utilisée lors des forages pétroliers en mer, est une tour en treillis d'acier dont les 4 pieds sont ancrés par des pieux dans le fond marin.

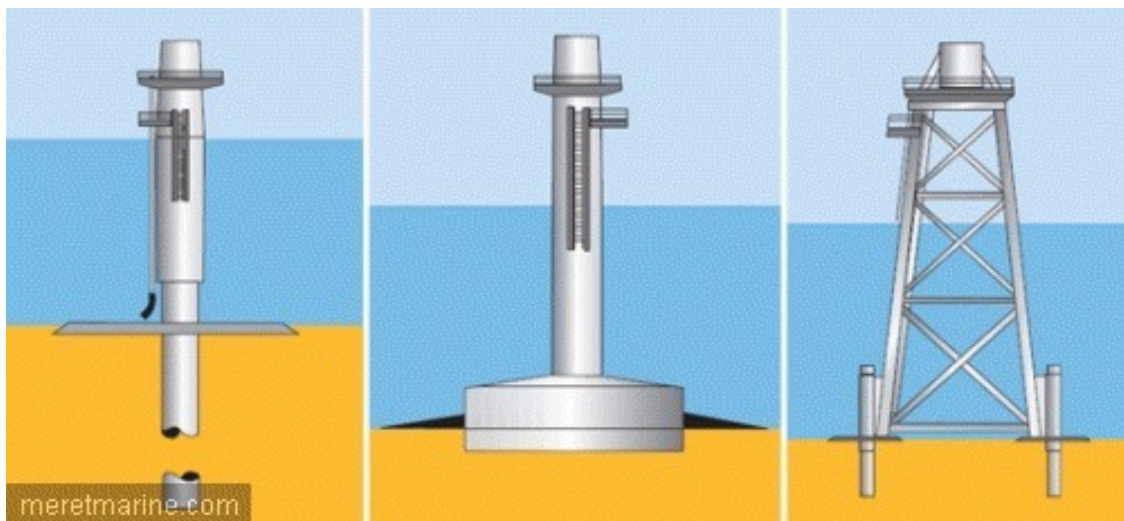


Construction à terre d'une fondation gravitaire



Fondation immergée et lestée

Le choix d'une technique plutôt qu'une autre est conditionné par la profondeur de la fondation et par la nature rocheuse du fond marin.



fondation monopieu

fondation gravitaire

fondation en treillis tubulaire

(document European Wind Energy association)

Elles ne sont pas à l'abri d'un accident

Malgré toutes les précautions prises lors de la construction, des accidents peuvent se produire :

- un système de refroidissement défaillant dans la nacelle peut provoquer son incendie,
- des contraintes mécaniques trop importantes sur les pales peuvent les briser,
- le givrage des pales peut provoquer des projections de blocs de glace,
- des vents très violents peuvent renverser toute l'éolienne.



Incendie de la nacelle d'une éolienne le 14 janvier 2016 lors de travaux d'entretien à Uedem, en Belgique



Pales brisées par un coup de vent en février 2016 à Dinéault, dans le Finistère.



En hiver, restez à bonne distance des éoliennes !



Effondrement d'une éolienne sur une autoroute allemande près de Bielefeld le 17 mai 2017.



Chute d'une éolienne au Canada

Prix d'une éolienne

On estime le coût de construction d'une éolienne à environ 1'000 € par kilowatt installé, soit environ 5 millions d'euros pour les plus grandes.

Le prix d'implantation d'une éolienne comprend :

- le coût de construction de l'éolienne ce qui représente un peu plus de 80% du prix total.
- le coût d'implantation (achat ou location du terrain, route d'accès, redevances aux communes) représente un peu moins de 20% du prix total.
- le coût d'exploitation et d'entretien s'ajoute au prix de la construction.

On estime le coût annuel d'entretien à 2% du prix de l'installation. La durée de vie d'une grande éolienne est estimée à une vingtaine d'années. Le prix du démantèlement en fin d'activité est pour l'instant largement sous-estimé et, si la société initiale a disparu, les propriétaires du terrain seront tenu d'en payer le prix !

Les sources de financement

Les projets du secteur des énergies renouvelables impliquent un investissement initial très lourd, puis un coût marginal de production très faible. Le coût du financement est un élément essentiel du coût final de l'énergie produite. Le passage aux énergies renouvelables est largement soutenu par les gouvernements et les tarifs largement garantis par la plupart des pays européens sur de longues périodes permettent des amortissements prévisibles.

Par ailleurs le développement de ce secteur d'activité est fortement soutenu financièrement par les gouvernements. Les investissements sont des d'actifs bien identifiés, sans beaucoup de risques, fonctionnant de manière autonome et générant des flux de revenus financiers prévisibles qui permettent de rembourser les banques avec un niveau de pertes très faible sur une longue période.

Les constructeurs d'éolienne

Les autorités politiques assurent que l'investissement dans les énergies alternatives créera des milliers d'emplois. Mais ce sont surtout les constructeurs et les installateurs qui sont les grands gagnants du marché des éoliennes. En 2015, cinq pays se partageaient près de 70% de la production mondiale. Ce sont la Chine avec environ 28 % du marché mondial, l'Allemagne (13 %), le Danemark (12%), le Etats-Unis (9.6%), et l'Espagne (5.5%). Ces constructeurs vendent, installent et entretiennent leurs machines. Les rendements ultérieurs ne les concernent pas vraiment.

Rentabilité des éoliennes

En France, l'électricité produite par les parcs éoliens bénéficie d'un tarif d'achat garanti (par EDF) très supérieur au prix de marché. Pour l'éolien terrestre, cette garantie est de 82 € par MWh pendant 10 ans, puis entre 28 € et 82 € pendant 5 ans selon les sites. Pour l'éolien offshore, le tarif d'achat est fixé à 130 € par MWh pendant 10 ans, puis entre 30 € et 130 € selon les sites. Ce soutien à la filière éolienne est répercuté sur la facture des consommateurs.

Il est difficile de prévoir comment évoluera le marché de l'électricité à long terme, lorsque les libéralités et avantages consentis par les autorités politiques prendront fin.

Ce que prétendent les opposants à l'installation d'éoliennes

Les constructeurs et installateurs s'allient à ceux qui investissent dans l'éolien car les plus values sont importantes et ils sont prêts à tout pour que les projets aboutissent. Leur unique problème étant de trouver des sites d'installation. L'argent est souvent à la fois leur seule motivation et leur arme secrète pour éventuellement corrompre des décideurs politiques ou financer des enquêtes d'impact complaisantes.

Reproches faits aux éoliennes

Elles défigurent le paysage

C'est une appréciation subjective mais bien réelle. Dans les stations de montagne, peu de gens se sont opposés à la construction de téléphériques et de remonte-pentes pourtant bien peu esthétiques. Les lignes à haute tension sont déjà plus contestées et de plus en plus de gens souhaitent leur enfouissement.



Paysage du Lavaux

Ce paysage composé de cultures de vignes, dominant le lac Léman avec une vue somptueuse sur les Alpes a été classé « Patrimoine de l'Humanité » par l'UNESCO. Il serait évidemment impensable d'y implanter des éoliennes !

Il est vrai qu'au Portugal, particulièrement en Andalousie, beaucoup de crêtes de montagnes sont souvent hérissées d'éoliennes et le paysage s'en trouve passablement altéré



Des éoliennes à perte de vue sur la côte Atlantique de l'Andalousie près de Tarifa.

Elles font du bruit

Les milieux des promoteurs d'éolienne affirment : « Les émissions sonores des éoliennes ne génèrent pas de conséquences sanitaires directes, tant au niveau de l'appareil auditif que des effets liés à l'exposition aux basses fréquences et aux infrasons. »

Les habitants proches des éoliennes, plus particulièrement ceux qui se trouvent à l'arrière de l'axe de l'éolienne, affirment que les nuisances sonores sont insupportables en dessous de 500 m mais elles ont des répercussions sérieuses jusqu'à 2.5 km et jusqu'à 4 km, ce qui représente une zone de dangerosité de 15 km² environ.

Ils semble que les pales des éoliennes émettent surtout des sons graves, les infrasons, qui se propagent très loin sans atténuation et qui sont peu arrêtés par les obstacles habituels. Ce sont des sons de 150 Hz soit d'une longueur d'onde d'environ 2 mètres. Ces infrasons traversent presque sans atténuation les toitures, les portes et les fenêtres.

Elles entraînent une perte de la valeur immobilière.

Les avis divergent selon qu'on entend un promoteur d'éoliennes ou un opposant. Mais diverses études sérieuses montrent qu'il y a effectivement une perte de la valeur des biens immobiliers dans un rayon proche d'éoliennes. Cette perte est estimée entre 2 et 20% suivant la proximité des éoliennes. Prenons 2 exemples :

- La cour de Rennes, le 20/09/2007, a situé la perte de valeur immobilière entre 28 et 46%, pour une maison construite à 500 mètres des éoliennes.
- Le tribunal d'Angers, le 9/04/2009, à estimé la perte de valeur immobilière à 20%, le parc éolien se trouvant à 1'000 mètres.

C'est un danger pour les oiseaux

Les oiseaux ne distinguent pas les pales d'éoliennes lorsqu'elles sont en rotation, et entrent en collision avec ces dernières. Les chauves-souris seraient particulièrement exposées. Là encore les avis sont partagés, les ornithologues estiment que le risque est grave, les promoteurs d'éoliennes minimisent leur impact.

Leur construction nécessite l'emploi de métaux rares

En plus des 1'200 tonnes de béton et 500 tonnes d'acier nécessaires à leur construction, il faut encore pour une éolienne de forte puissance, environ 600 kg de néodyme pour la confection des aimants permanents du générateur électrique. L'alliage est composé de néodyme, de fer et de bore (Nd₂Fe₁₄B). Il existe aussi des alliages samarium/cobalt SmCo₅. Le néodyme et le samarium sont des terres rares, très coûteuses et peu répandues dans la croûte terrestre.

Les éoliennes dépendent des caprices du vent

Le principal inconvénient des éolienne, est l'intermittence de leur fonctionnement. Elles ne fournissent de l'électricité que lorsque le vent l'a décidé et, souvent, quand on n'en a pas besoin. Le constat est le même pour les panneaux photovoltaïques. La nuit ou pendant les jours sombres de l'hiver ils ne produisent que peu ou pas d'électricité. On peut tromper le citoyen en lui faisant miroiter que la construction d'une éolienne dans son voisinage va suffire à la consommation de 5'000 ménages mais on ne lui dit pas que les nuits d'hiver sans vent il en sera réduit à jouer au cartes à la lueur d'une bougie si les sources conventionnelles d'électricité sont négligées voir même abandonnées. On ne pourra donc supprimer ni les lignes à haute tension, ni les centrales conventionnelles. Pour mieux appréhender cette évidence, il faut comprendre comment les électriciens abordent le problème de la consommation de l'électricité. On en parlera plus loin.

Et l'énergie photovoltaïque ?

Effet photoélectrique et photons

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau exposé à la lumière. Rappelons que la lumière est la partie du rayonnement électromagnétique que l'oeil humain peut détecter.

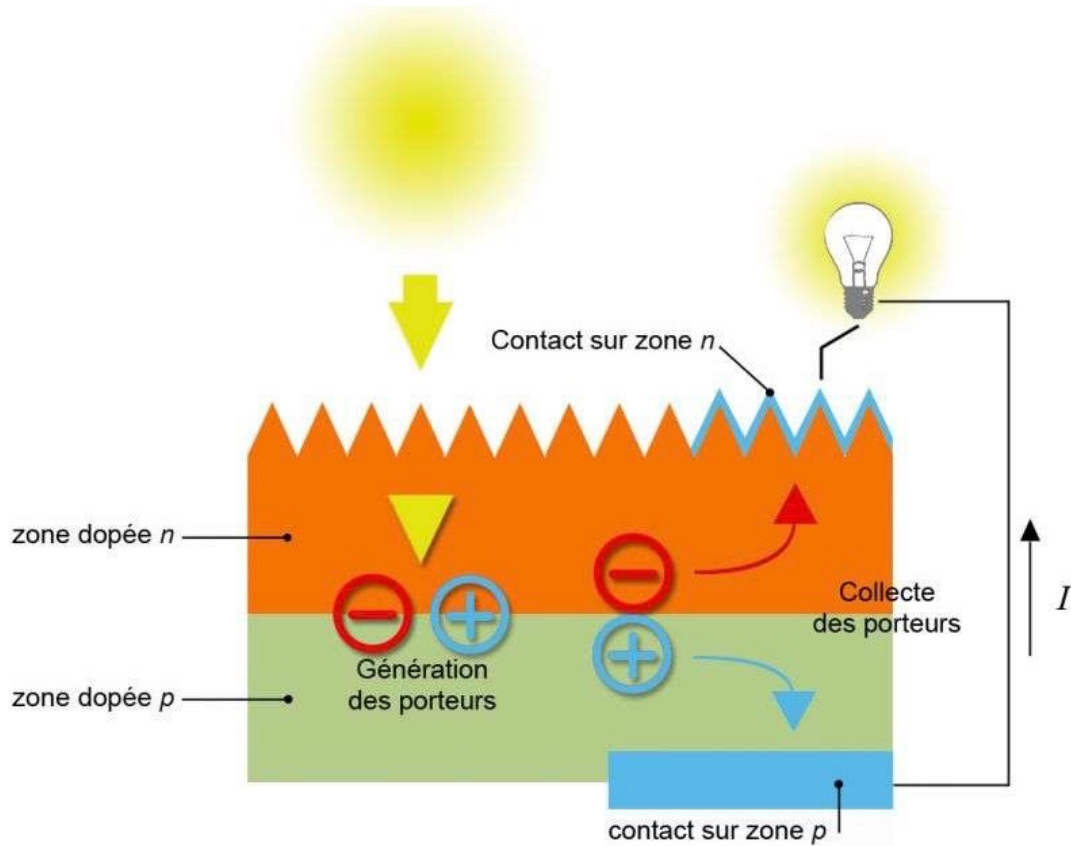
L'effet photoélectrique avait déjà été observé par Antoine Becquerel et son fils Alexandre en 1839. A cette époque on pensait que la lumière était de nature ondulatoire. Mais, en 1905, Albert Einstein propose une théorie en appliquant à la lumière la notion de quantum d'énergie développée par Max Planck en 1900. Il explique donc que l'effet photoélectrique est dû à l'absorption de "quanta de lumière" par le matériau. Il vient de découvrir ce "grain de lumière" qu'on baptisera un peu plus tard **photon**. Cette découverte lui vaudra le prix Nobel en 1921.

Les photons d'une source lumineuses possèdent une énergie qui dépend uniquement de la fréquence. Un photon ne peut provoquer l'expulsion d'un électron du matériau absorbant que si la fréquence de la lumière est supérieure à une fréquence limite appelée **fréquence seuil**. Cette dernière dépend du matériau utilisé.

Comment fonctionne une cellule photovoltaïque

On assemble deux couches très minces de matériau semi-conducteur, du silicium le plus souvent. L'une des couche est dopée par des traces de phosphore. Ce dernier atome possède cinq électrons sur sa couche périphérique alors que tous ses voisins silicium n'en possèdent que quatre. Il y a donc un électron qui peut se balader assez librement dans cette couche dite "dopée n".

L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ne possèdent que trois électrons sur sa couche périphérique. Il y a donc des "trous" qui accueilleraient bien volontiers un électron de passage.



Lors d'une collision avec les atomes, les photons transfèrent leur énergie aux électrons et forcent certains d'entre eux à quitter leur place. Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant. Il s'établit alors un faible courant continu. Le contact entre la zone dopée n et la zone dopée p force les électrons à se diriger vers l'autre plaquette où ils seront recueillis par une zone de contact à la base de la zone p.

On peut utiliser d'autres substances semi conductrices, le germanium, l'arséniure de gallium, le tellure de cadmium ou de cuivre recouvert d'indium ou de sélénium. Mais la rareté de ces éléments ou leur toxicité compromettent leur avenir.

Mais il faut du silicium !

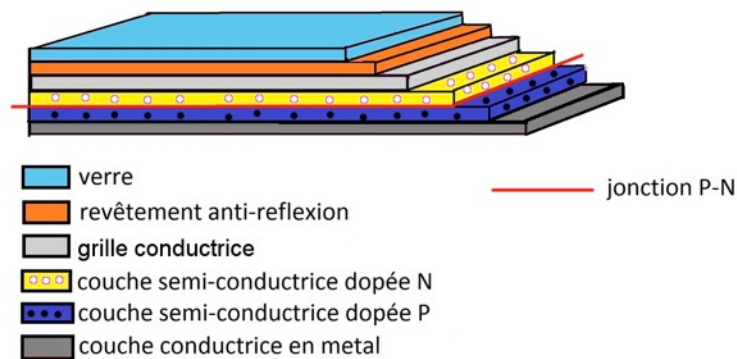
Pour réaliser des cellules photoélectriques on a besoin de plaquettes très minces de silicium métal extrêmement pur. Le silicium est un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre où il est surtout présent sous forme de quartz, SiO_2 et de grains de sables issus de la décomposition des roches granitiques. La liaison entre le silicium et l'oxygène est extrêmement forte. Pour obtenir le silicium métal, on chauffe le sable dans des fours à arcs électriques à une température un peu supérieure à $3'000^\circ$ en présence de coke. Ce dernier absorbe l'oxygène et produit du CO et du CO_2 . Le silicium est alors soutiré par des orifices prévus à cet usage.

Après plusieurs opérations de purification le silicium est coulé dans des lingots cylindriques. On peut obtenir du silicium polycristallin ou monocristallin suivant la technique employée.

Les lingots sont ensuite découpés en plaquettes de 2 à 3 dixièmes de millimètre d'épaisseur.

Schéma d'une cellule photovoltaïque

Pour assurer une certaine solidité, les fragiles plaquettes de silicium sont prises en sandwich dans un assemblage qui comprend, de la surface vers la base, une plaque de verre de protection, un revêtement anti-réflexion, une grille conductrice, les deux couches semi-conductrices N et P et une seconde grille conductrice. Les 2 grilles conductrices recueillent le courant produit.



Un panneau photovoltaïque est un assemblage de cellules

Lorsque l'ensoleillement est maximum (1000 w/m^2) une cellule solaire d'une surface de 100 cm^2 ($10\text{cm} \times 10\text{cm}$) génère une puissance d'environ 1.25 watt pour une tension d'environ 0.3 volts, ce qui est très faible. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Pour augmenter la tension et la puissance, on assemble donc un certain nombre de cellules. Les panneaux solaires sont constitués de 36 à 120 cellules. On les relie entre elles en série pour augmenter le voltage ou en parallèle pour augmenter la puissance.

Un assemblage en série de 36 cellules fournit une tension de 12 volts; avec 72 cellules on obtient 24 volts. Malheureusement le mauvais fonctionnement d'une seule cellule, ou si celle-ci se trouve subitement à l'ombre, perturbe tout le système. On équipe donc les jonctions de diodes dites "by-pass" qui permettent de court-circuiter la cellule déficiente.

On relie ensuite les assemblages entre eux mais cette fois-ci en parallèle, ce qui augmente la courant disponible.

Panneau photovoltaïque composé de 36 cellules.

La tension est de 12 v pour une puissance maximum de 120 w. Dans des conditions favorables d'ensoleillement Ce panneau peut fournir à une batterie jusqu'à 84 ah. En hiver, cette production peut tomber à 6 ah.



Usage des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques peuvent être exploités de plusieurs manières. Cela peut être un usage domestique avec une petite unité de production installée sur le toit. On distingue alors une installation complètement autonome, dans des maisons isolées ou une installation mixte qui intègre le réseau national de distribution de l'électricité.

Au-delà, on installe des champs d'éoliennes sur d'immenses surfaces et ce sont alors des usines de productions d'électricité.

Usage indépendant

Si vous êtes un écolo bon teint qui ne souhaitez utiliser que votre propre production ou que vous habitez dans un endroit isolé non alimenté par un réseau de distribution, il vous faudra stocker l'électricité produite dans des batteries pour ne pas dépendre du côté aléatoire de la production des panneaux. Par ailleurs, il faudra aussi un groupe électrogène pour pallier à une probable longue période de manque d'ensoleillement, en hiver par exemple.



Pour un ménage de 4 personnes qui souhaite regarder la télévision, faire fonctionner son lave-linge, son lave-vaisselle, son grille-pain, son frigo et son congélateur, il faut compter sur une consommation d'environ 4000 kWh par an. Cette valeur ne prend en compte ni le chauffage ni la production d'eau chaude.

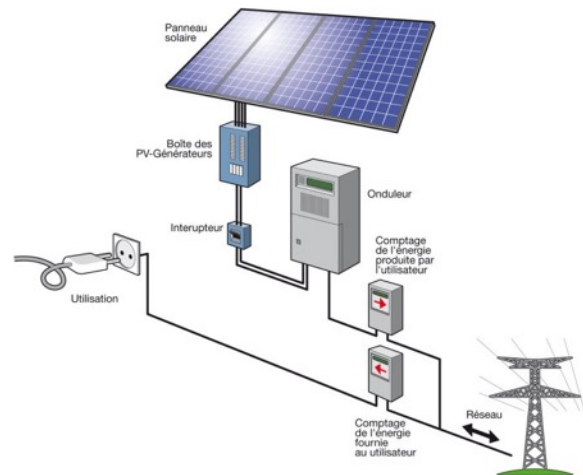
Sur la plateau suisse, il faudrait environ :

- 40 m² de panneaux,
- une batterie lithium-ion d'une capacité de stockage d'au moins 10 kWh,
- un onduleur qui délivre un courant alternatif de 230 v.
- un groupe électrogène d'au moins 4000 w

Vous serez complètement indépendants d'un réseau de distribution mais devrez constamment surveiller le bon fonctionnement de votre installation.

Usage collectif

Votre production est alors reliée au réseau de distribution de votre région. Lorsque votre installation produit plus d'électricité que vous n'en consommez, l'excès de votre production est injecté dans le réseau général. Lorsque vos panneaux ne sont pas en mesure d'assurer votre consommation, la nuit par exemple, c'est le réseau général qui vous alimente. Le compteur électrique fonctionne dans les deux sens. Un contrat existe entre le distributeur et vous sur le prix auquel il vous rachète votre production et le prix auquel il vous vend l'électricité lorsque votre installation est défaillante.



Centrales solaires photovoltaïques

Les autorités politiques qui optent pour une transition énergétique, encouragent financièrement l'installation d'immenses champs de panneaux solaires. Ainsi, en Gironde, on a inauguré récemment la plus grande centrale solaire photovoltaïque de France. Un million de panneaux solaires recouvrent une surface de 260 hectares. Ce parc solaire peut produire 350 gWh mais sa production s'arrête la nuit et diminue lorsque l'ensoleillement vient à manquer. En comparaison, une tranche nucléaire produit environ 1'000 GWh, peu importe les conditions de lumière.



Centrale de Caesta, Gironde

Insertion des éoliennes et des panneaux photovoltaïques dans la production d'électricité

Aspects de la consommation électrique

L'électricité doit être consommée au moment même de sa production. On ne peut pas la stocker. Il faut donc constamment adapter la production des centrales pour satisfaire la demande instantanée des consommateurs. Cette demande est très variable et obéit à de nombreux facteurs.

Comment se présente donc cette variation ?

Il y a tout d'abord une variation diurne de la demande : elle est forte la journée lorsque toutes les usines et les entreprises fonctionnent à plein rendement, elle est faible la nuit lorsque l'activité humaine est ralentie. À cette variation diurne se superpose une variation saisonnière attachée à la température de l'air et à la longueur du jour. Au mois d'août, une partie de la population est en vacances, certaines entreprises sont fermées, la durée du jour est longue. La consommation est faible.

En hiver, sous nos latitudes, la consommation atteint son plus haut niveau aux alentours du deuxième mercredi de décembre vers onze heures du matin. L'activité industrielle fonctionne au maximum de sa capacité; dans les bureaux toutes les secrétaires habillées légèrement ont allumé les radiateurs électriques d'appoint, les grands magasins et les rues débordent d'éclairages supplémentaires installés pour la période des fêtes et vers onze heures du matin, les cuisinières électriques commencent à fonctionner !

Comment répondre à cette demande irrégulière ?

*Les producteurs d'électricité doivent toujours être en mesure de répondre instantanément aux fluctuations de la demande. La variation de consommation peut être brusque et de grande amplitude au niveau d'une petite agglomération. Par contre ces variations sont atténuées si on considère une plus vaste région. En effet, la variation instantanée de la demande de deux régions ne se fait pas nécessairement au même instant et la compensation instantanée de ces variations atténue leur amplitude. D'un autre côté, il n'est pas possible à une seule centrale régionale de s'adapter instantanément sa production à la demande locale. Pour cette raison, la plupart des centrales sont liées les unes aux autres. C'est **l'interconnexion des réseaux électriques**. Et c'est ici qu'apparaît l'importance des lignes de transport électrique à très haute tension. Elles doivent être conçues pour pouvoir supporter la charge maximale des pointes de consommation et pour répartir sur un vaste territoire l'énergie des régions productrices vers les régions consommatrices.*



Lignes à haute tension nécessaires à l'interconnexion des réseaux européens

L'allure générale de la variation de la consommation est bien connue et les producteurs augmentent ou diminuent la production des centrales, arrêtent ou mettent en marche d'autres unités de production en fonction de la demande.

- **Les centrales nucléaires** qui ont besoin de près de 24 heures pour être arrêtées et remises en marche, assurent la production de base et fonctionnent quasiment en permanence.
- **Les centrales thermiques** qui ont besoin d'environ 2 heures pour être mises en marche, assurent les fluctuations lentes.
- **Les centrales hydroélectriques**, dont on peut moduler le régime de production en quelques minutes, permettent d'absorber les pointes de consommation. Elles sont arrêtées lorsque la consommation diminue. Cette variation implique la maîtrise des moyens de production.

Intermittence de la production dite verte

La production des éoliennes échappe en grande partie au contrôle des électriciens responsables de réguler la production instantanée. C'est là leur inconvénient majeur.

Les installations photovoltaïques ne produisent de l'énergie que lorsque la luminosité est suffisante. Toutefois, en tenant compte de la latitude et de la saison on peut prévoir plus facilement leur production. Il est évident que le rendement est meilleur au Maroc qu'en Belgique. Le rendement baisse aussi lorsque la couverture nuageuse est très dense.

La réponse au problème de l'intermittence de la production des éoliennes et des panneaux photovoltaïques pourrait se résoudre si on trouvait un moyen de stocker momentanément l'électricité en période de surproduction puis la restituer au moment d'une plus forte demande. Diverses solutions sont proposées mais, pour l'instant, aucune n'est en mesure d'absorber puis de restituer les énormes quantités d'électricité qui seraient nécessaires de stocker pour équilibrer production et utilisation.

Distorsion du marché de l'électricité

Le prix instantané de l'électricité varie fortement au fil des heures, des jours et des saisons, en fonction de l'offre et de la demande, alors que les consommateurs paient leur électricité à prix fixe, entre 18-28 centimes par kWh, en Suisse, selon les distributeurs, prix qui inclut l'acheminement et les taxes, ces deux derniers éléments comptant pour plus de la moitié des coûts.

Le courant vert injecté dans le réseau par les éoliennes et les panneaux photovoltaïques, généralement en milieu de journée si le vent est favorable, crée une surcapacité, qui contribue à faire chuter les prix de l'électricité de pointe achetée par les distributeurs. Ainsi, le prix de l'électricité de pointe a chuté de plus d'un tiers depuis 2008, passant de près de 11 centimes en moyenne à moins de 6 centimes par kWh en 2014. Ce prix est biaisé car le courant vert est largement subventionné et il jouit d'une priorité sur le réseau qui le rend concurrentiel car on oblige les distributeurs à racheter en priorité l'électricité provenant des éoliennes et des panneaux photovoltaïques.

Autrefois, chaque pays se souciait de préserver son autonomie en matière d'approvisionnement électrique. Ainsi la Suisse pouvait compter sur ses barrages qui lui assurent environ 60% de son approvisionnement et sur ses centrales nucléaires qui assuraient presque le 40% restant. Les distributeurs étaient souvent actionnaires des usines électriques dont il vendaient la production.

Aujourd'hui, avec la libéralisation du marché de l'électricité, comme de bons commerçants, ils achètent une partie de la surproduction européenne largement subventionnée à des prix beaucoup plus bas que les fournisseurs traditionnels suisses. Ils font des bénéfices substantiels mais cela ne se reflète pas sur les factures des consommateurs ! Et on renonce de fait à pérenniser l'autonomie nationale en matière d'électricité pour des profits immédiats.

Cette situation met les propriétaires de barrages qui ne bénéficient d'aucune subvention dans une situation embarrassante et les empêchent d'entretenir leurs ouvrages et d'investir pour des améliorations de leur outil de production. Et pourtant, eux, leur électricité est 100 % renouvelable !

Comment stocker l'énergie ?

L'aspect intermittent et aléatoire de la fourniture d'électricité par les éoliennes et les panneaux photovoltaïques pourrait être compensé par un système de stockage de l'électricité en période de surproduction afin de pallier à l'absence de production lorsqu'il n'y a pas de vent.

Mais voilà, l'électricité n'est pas une énergie, elle n'est qu'un vecteur d'énergie. Il faut donc trouver un système de stockage indirect de l'énergie. Cela peut être :

- un système d'élévation d'une masse d'eau par la technique du pompage/turbinage,
- une réaction chimique réversible (batterie),
- une production de gaz combustible (hydrogène, méthane),
- un stockage d'air comprimé.

Ces diverses techniques ont toutes leurs limites et il est quelque peu illusoire de penser qu'elles pourront résoudre facilement le problème du stockage d'énergie à grande échelle.

Technique du pompage/turbinage

C'est actuellement la seule méthode vraiment efficace d'accumulation de quantités importantes d'énergie. Le principe consiste à refouler par pompage l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur lorsqu'il y a excès d'électricité et turbiner cette eau dans l'autre sens en période de forte demande. C'est un façon d'accumuler de l'énergie sous forme potentielle. La taille importante des installations permet de stocker de grandes quantités d'énergie. Toutefois cette alternative est limitée aux régions montagneuses et par le nombre disponible des bassins d'accumulation en altitude.

Exemple du Nant-de-Drance

La centrale de pompage-turbinage de Nant-de-Drance, dans le Valais, à la frontière française, utilise la différence de niveau entre deux lacs de retenue existants pour produire et stocker de l'énergie. Lorsque les besoins en électricité sont importants, l'eau stockée dans le lac du Vieux-



Lac supérieur du Vieux-Emosson au premier plan et lac inférieur d'Emosson dans le lointain.

Emosson chute vers la centrale souterraine via deux puits verticaux de 425 m de haut. Elle y est turbinée pour produire de l'électricité puis l'eau est déversée dans le lac d'Emosson.

A l'inverse, lorsque les besoins en électricité sont moindres, l'eau du lac d'Emosson est pompée vers le lac du Vieux-Emosson. La centrale de Nant-de-Drance permet ainsi de stocker l'énergie l'électricité sous forme potentielle lorsque celle-ci est excédentaire sur le réseau.

Un groupe de 6 turbines/pompes totalisant une puissance de 900 MW permet de passer de la phase pompage à celle de turbinage à pleine puissance en moins de 10 minutes. Le rendement est d'environ 80%.

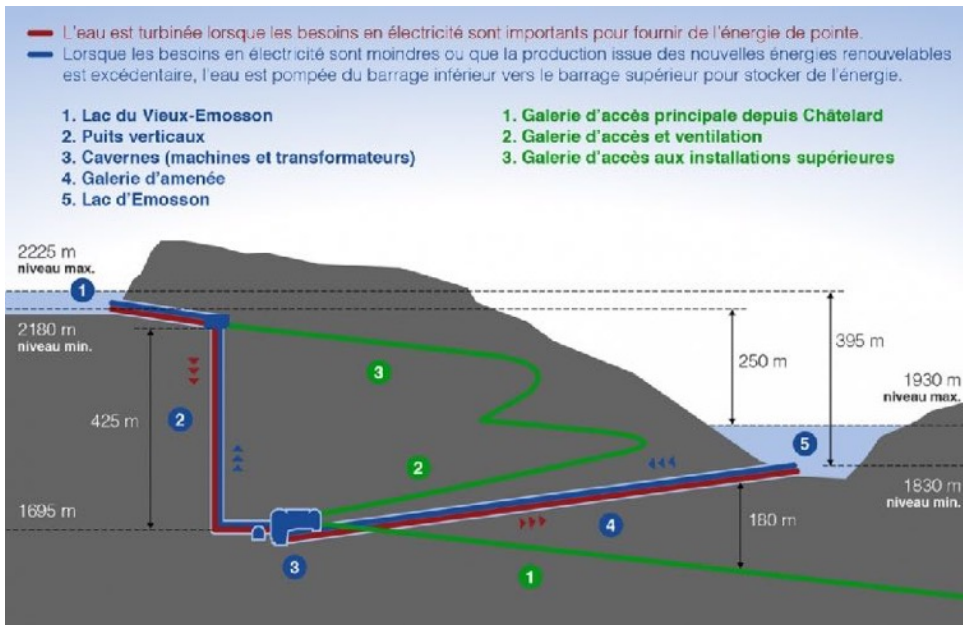
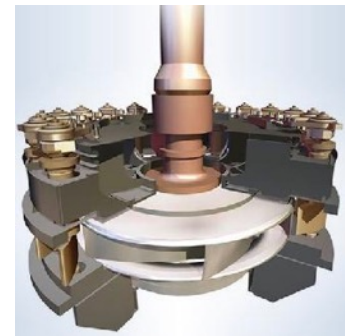


Schéma du fonctionnement de l'installation de pompage/turbinage de Nant-de-Drance

Pompe-turbine d'une puissance de 150MW. Elle fonctionne comme turbine lors de la production d'électricité et comme pompe, dans le sens inverse, pour remonter l'eau dans le lac supérieur pendant les heures creuses de consommation.



Le barrage de l'Hongrin

Le barrage de l'Hongrin, situé dans les Préalpes vaudoises, retient le plus grand lac de pompage-turbinage de Suisse (55 millions de m³). Situé à 1255 mètres d'altitude, son eau est turbinée, lors des heures de grande consommation, dans la centrale de Veytraux au bord du lac Léman, 878 mètres plus bas. En période de faible consommation, lorsqu'il y a un excédent d'électricité, de puissantes pompes réalimentent le barrage en sens inverse avec de l'eau puisée dans le lac.



Barrage de l'Hongrin

En France, la capacité des installations de pompage/turbinage est d'environ 4'200 MW. En Suisse, la capacité est d'environ 4'000 MW. Cela semble des puissances importantes mais elles sont encore tout à fait insuffisantes en regard des quantités d'énergie qu'il faudrait pouvoir stocker pour compenser l'intermittence des éoliennes et des panneaux solaires.

En Suisse, d'autres capacités significatives sont actuellement en cours de développement ou en projet: Linth-Limmern (puissance de turbinage de 1480 MW), Lago Bianco (puissance de turbinage de 1000 MW), Grimsel 3 (puissance de turbinage de 660 MW). Mais les conditions actuelles du marché ont fortement affecté l'environnement propice aux investissements en Suisse. Et depuis que l'Allemagne inonde le marché avec du courant bon marché hautement subventionné, le modèle économique reposant sur la vente d'énergie de pointe issue de centrales de pompage connaît de grands bouleversements. L'exploitation des centrales de pompage-turbinage n'a donc presque plus d'intérêt. C'est pourquoi certains projets de développement de capacités de stockage dans les Alpes sont reportés.

Stockage par réaction chimique

Un accumulateur électrique utilise le principe d'une réaction chimique réversible. Le principe est basé sur la présence de 2 électrodes, l'une positive, l'anode, l'autre négative, la cathode, plongées toutes deux dans un électrolyte, une solution généralement acide servant de conducteur. Elles sont séparées par une membrane semi-poreuse. L'accumulateur absorbe et restitue un courant continu.

Le déplacement de ions durant la réaction chimique implique aussi le déplacement d'électrons soit un courant électrique aux bornes des électrodes.

A la différence d'une batterie, une pile est alimentée par une réaction chimique non réversible.

Batterie au plomb

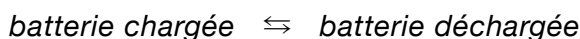
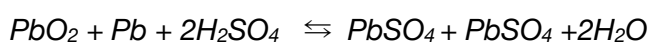
L'exemple classique le plus courant est la batterie au plomb utilisée dans la quasi totalité des automobiles pour le démarrage du moteur.

Elle est constituée de 2 électrodes en plomb, dont l'une est oxydée (l'anode), plongées dans de l'acide sulfurique, H_2SO_4 .

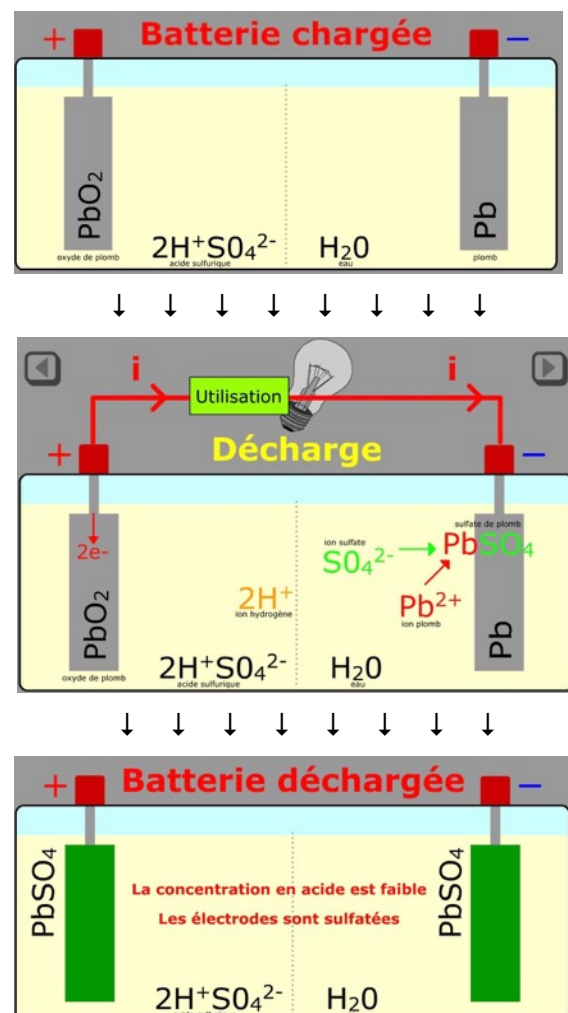
En se déchargeant, les électrodes se transforment en sulfate de plomb, $PbSO_4$, et l'acide sulfurique en eau.

Lors de la recharge, les ions SO_4 reconstituent avec l'eau de l'acide sulfurique, la cathode redevient du plomb et l'anode du plomb oxydé.

La réaction réversible peut s'écrire :



Au cours de la décharge, les électrons se dirigent de l'anode vers la cathode. Au cours de la recharge on fait circuler les électrons dans le sens inverse.



Un élément de batterie délivre un courant continu d'environ 2.1 volts. On peut augmenter le voltage en réunissant plusieurs éléments connectés en série. Dans les automobiles on utilise des batteries de 6 volt constituées de 3 cellules ou de 12 volts constituées de 6 cellules.



La capacité de stockage est mesurée en ampère-heures [Ah].

- **L'énergie massique**, soit la quantité d'énergie disponible par kg est exprimée en watt-heure par kg [Wh/kg.]

Pour une batterie au plomb cette valeur est de 35 Wh/k. C'est assez faible. Mais comme elle peut fournir un courant de crête assez élevé, elle est très utilisée pour le démarrage des moteurs d'automobiles.

Les anciens sous-marins du type Aréthuse, longs de 50 m. et pesant environ 600 tonnes, étaient équipés de 160 éléments d'accumulateurs au plomb pesant 60 tonnes. Ces accumulateurs ne leur permettaient de naviguer en propulsion électrique que quelques heures seulement.

Energie massique et durée de vie de quelques types d'accumulateurs

	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Wh/kg	35	60	90	150
Durée de vie (nb de cycles)	500	2000	1500	1000

Autres batteries

Les besoins de batteries plus puissantes et moins encombrantes a permis de développer des systèmes plus performants basés sur d'autres types d'électrodes. Les plus performantes utilisent du lithium sous diverses formes. Parmi les diverses batteries imaginées, citons les principales :

- **nickel-cadmium** avec électrodes d'hydroxyde de nickel et de cadmium. Les performances sont intéressantes mais la présence de cadmium, dangereux pour l'organisme en a interdit l'usage privé. Elles sont limitées à des usages bien spécifiques, aviation et sécurité ferroviaire.
- **nickel-hydrure métallique**, batterie sans substances dangereuses, à haute performance, très utilisée dans les voitures hybrides, les téléphones portables, les ordinateurs, les perceuses.
- **lithium-ion**, très bon rapport d'énergie disponible/poids. L'anode est généralement un oxyde de cobalt qui héberge des ions de lithium, la cathode du graphite. Les batteries lithium-ion occupent une place prédominante dans l'électronique portable. Toutefois il y a un petit risque de surchauffe, voire plus rarement d'explosion.

Usage limité des batteries

La recharge d'une batterie nécessite du courant continu. La restitution de l'énergie sous forme de courant continu convient parfaitement pour les appareils portables : téléphones, ordinateurs portables, perceuses, torches électriques et autres appareils de puissance modeste.

Les voitures électriques sont équipées des moteurs à courant continu et utilisent donc directement le courant fourni par les batteries. Il en est de même pour les vélos et scooters électriques.

Par contre pour le stockage de quantités importantes d'électricité il faut redresser le courant provenant du réseau pour alimenter les batteries en courant continu. Il faudra par la suite le moduler ce courant pour le restituer au réseau sous forme alternative lorsqu'on en aura besoin.

Les quantités d'énergie stockées sont toujours relativement limitées et il n'est pas possible d'imaginer qu'on puisse stocker les immenses quantités d'énergie nécessaires pour pailler à l'intermittence des éoliennes.

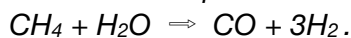
Au moyen de l'hydrogène

Il est tentant d'imaginer qu'on puisse produire de l'hydrogène lorsqu'il y a excès d'électricité et retransformer cet hydrogène en électricité lorsqu'on en a besoin. Mais voilà, ce n'est pas si facile !

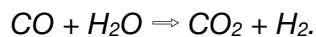
L'hydrogène existe surtout comme un des composants de l'eau et du méthane. Une molécule d'eau, H_2O est constituée de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. Le méthane CH_4 est constitué d'un atome de carbone et de 4 atomes d'hydrogène. La liaison entre ces atomes est extrêmement forte et il faut beaucoup d'énergie pour les dissocier les uns des autres. Il existe plusieurs moyens de produire de l'hydrogène :

A partir du méthane

Le gaz naturel est composé essentiellement de méthane CH_4 . Pour dissocier cette molécule il faut mélanger le méthane à de la vapeur d'eau en présence d'un catalyseur, à une température d'environ 900° et une pression de 25 bars. La première réaction est :



Une deuxième réaction permet de transformer le CO en CO_2 libérant encore un peu d'hydrogène :



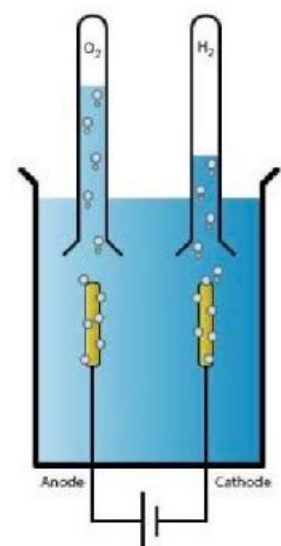
C'est actuellement la méthode la plus utilisée pour la production d'hydrogène. L'inconvénient de celle-ci est qu'il faut disposer de méthane et qu'elle est émettrice d'une quantité non négligeable de CO_2 . Quant à l'énergie nécessaire, il faut compter environ 3.5 kWh par m^3 d'hydrogène produit à pression ordinaire.

Par ailleurs, on n'a aucun avantage à produire de l'hydrogène à partir du méthane car la combustion d'un m^3 de méthane libère une énergie de 10 kWh alors que un m^3 d'hydrogène ne libère que 3 kWh.

Par l'électrolyse de l'eau

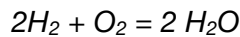
Un courant continu circule dans de l'eau légèrement salée pour améliorer sa conductibilité. L'énergie électrique dissocie les molécules d'eau. L'hydrogène se dégage au dessus de la cathode, l'oxygène au-dessus de l'anode. L'électrolyse d'un litre d'eau nécessite 5 kWh et produit un mètre cube d'hydrogène à pression ordinaire.

La densité énergétique de l'hydrogène est faible : $1m^3$ d'hydrogène correspond à l'énergie contenue dans 0.3 litre d'essence. De plus, l'électrolyse n'a qu'un rendement d'environ 60%. L'énergie renfermée dans $1m^3$ d'hydrogène n'est donc plus que de 3 kWh. Par ailleurs l'hydrogène est un gaz encombrant et il faut le comprimer ou le liquéfier pour le stocker dans un volume raisonnable. La compression d'un m^3 à 700 bars nécessite environ 0.45 kWh et sa liquéfaction 1 kWh.



Utilisation de l'hydrogène

La combustion de l'hydrogène transforme à nouveau ce gaz en eau selon le schéma :



Cette énergie est alors restituée sous forme de chaleur et non sous forme mécanique. Si on utilise directement l'hydrogène dans un moteur à explosion dont le rendement n'excède pas 25%, on constate un grand gaspillage des 5 kWh originels qu'il a fallu pour le produire. Par ailleurs, il faut des réservoirs très lourds capables de résister à une pression de 700 bars.

On peut produire encore de l'électricité par le biais d'une pile à combustible. Mais là aussi, le rendement est assez faible, de l'ordre de 60%. On voit que le stockage de l'énergie électrique par le biais de l'hydrogène n'est pas très favorable.

Attention !

- L'énergie mécanique est une énergie que je qualifie de **noble**,
- la **chaleur** est une énergie que je qualifie de **"bâtarde"**

En effet si le 100% de l'énergie mécanique se transforme en chaleur, l'inverse n'est pas vrai. Les lois inexorables de la thermodynamique montrent que ce n'est guère 35% de la chaleur qui peut être convertie en énergie mécanique dans les moteurs et turbines à gaz ou à vapeur !

Au moyen d'air comprimé

Certains préconisent le stockage au moyen d'air comprimé. En période de production excédentaire d'électricité on comprime de l'air dans des cavernes souterraines puis, lorsque la demande augmente cet air sert à produire de l'électricité par le biais de turbines alimentées par l'air comprimé.

Des essais ont lieu actuellement à Biasca, au Tessin, dans une ancienne galerie techniques du Tunnel sous le Gothard aujourd'hui abandonnée. Dans cette galerie longue de 120 mètres on comprime de l'air à 100 bars. La chaleur produite par la compression (550°) sera utilisée pour des besoins de chauffage. En période de forte demande, l'air sera dirigé vers une turbine à air qui entraînera un générateur d'électricité. Les promoteurs, qui ont déjà investi 4 millions de francs dans ce projet, estiment pouvoir alimenter en électricité la ville de Lugano pendant 12 à 20 heures.



Galerie d'essai à Biasca

La section destinée au stockage de l'air est fermée à ses deux extrémités par une épaisse paroi de béton fermée d'une porte d'acier.

Conclusion personnelle

Les querelles qui opposent les promoteurs du solaire et de l'éolien, soutenus inconditionnellement par les milieux écologiques, et les promoteurs d'énergie nucléaire et des barrages hydroélectriques sont très complexes. Ces derniers défendent leur outil de production alors qu'une grande partie de l'opinion publique est influencée par des dogmes et des croyances relayées par les médias et les milieux politiques.

Oui, les éoliennes et les panneaux solaires produisent de l'électricité sans émettre directement du CO₂. Mais on occulte l'énergie dissipée pour la production du silicium, du néodyme, et autres constituants rares nécessaires à la production d'aimants permanents, de batteries et de panneaux solaires. Par ailleurs le problème du stockage de l'énergie nécessaire pour pallier à l'intermittence de ces sources est très loin d'être résolu.

D'un autre côté, on mélange les genres et les mêmes défenseurs de l'environnement préconisent l'arrêt des centrales nucléaires qui, elles, ne produisent quasiment pas de CO₂. Or le déficit d'énergie qu'engendrerait l'arrêt de ces centrales ne peut absolument pas être compensé par l'éolien ou le photovoltaïque. En Allemagne, l'arrêt des centrales nucléaires implique la remise en fonction de nombreuses centrales à charbon. L'effet souhaité de produire de l'électricité sans émettre de CO₂ n'est donc pas du tout réalisé.

Il y a deux qualités d'énergie

L'énergie peut se présenter sous deux formes selon la façon dont elle est utilisée. Sans entrer dans les lois compliquées de la thermodynamique, on peut donner une explication simple de ces deux formes d'énergie.

- La première est la forme noble : c'est **l'énergie mécanique**.
- La seconde est une forme dégradée : c'est **la chaleur**.

Dans tous les cas, la totalité de l'énergie que nous utilisons finit par se dégrader. Elle se transforme inexorablement en chaleur qui est diffusée dans l'espace interplanétaire sous forme d'un rayonnement infrarouge.

L'énergie mécanique

C'est **l'énergie potentielle** que possède un corps situé dans une position élevée et qui la restitue en passant à une station plus basse. C'est, par exemple, l'énergie qu'on peut retirer directement de la dénivellation d'un cours d'eau par l'intermédiaire du moulin qui, à son tour, entraîne une meule pour moudre le grain ou anime les scies qui débitent les troncs d'arbres en planches. Dans les siècles qui nous ont précédés, les industries qui avaient besoin d'énergie s'installaient par nécessité le long des cours d'eau.

L'énergie potentielle est proportionnelle à la masse $[M]$ multipliée par la différence d'altitude $[h]$ et l'accélération de la pesanteur $[g]$, soit :

$$\text{Energie potentielle : } E_{\text{pot}} = M \times g \times h$$

C'est aussi **l'énergie cinétique** que possède un corps en mouvement et qui la restitue en ralentissant. Elle est proportionnelle à la moitié de la masse en mouvement multipliée par le carré de la vitesse soit :

$$\text{Energie cinétique : } E_{\text{cin}} = \frac{M \times v^2}{2}$$

On peut aisément comprendre qu'une voiture roulant à 50 Km/h délivre beaucoup d'énergie lorsqu'elle s'écrase sur un obstacle. L'énergie a servi à tordre les tôles et à endommager

l'obstacle. En doublant la vitesse, soit 100km/h, on quadruple l'énergie produite et les dégâts sont beaucoup plus importants !

Si la voiture avait tout simplement freiné, l'énergie produite l'aurait été sous forme de chaleur dissipée par les disques de freinage et la friction des pneus sur l'asphalte.

La chaleur, une forme dégradée d'énergie

*C'est une forme d'énergie qu'on pourrait qualifier de **bâtarde** ou de **dégradée**. En réalité, il faut préciser que lorsqu'on dit chaleur, on entend source de chaleur par rapport à un environnement plus froid.*

*Une source de chaleur peut produire de l'énergie mécanique (énergie noble) par l'intermédiaire d'une **machine thermique**. Les principales machines thermiques que nous connaissons sont les machines et les turbines à vapeur, les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz (réacteurs d'avion).*

Toutes ces machines sont soumises aux lois inexorables de la thermodynamique qui ne leur accordent qu'un rendement assez faible. Ainsi les vénérables locomotives à vapeur gaspillaient la plus grande partie de l'énergie - qu'elles tiraient de la combustion du charbon ou du mazout - à chauffer le ciel, car elles n'utilisaient guère que le 20% de cette énergie pour faire avancer le train.



Ces deux formes d'énergie ne sont pas de même qualité

- **L'énergie mécanique** peut se transformer (et se transforme inexorablement) en chaleur avec un rendement de 100 %.
- **Une source de chaleur** ne peut être transformée en énergie mécanique qu'avec un rendement limité à 35 % environ, dans le meilleur des cas. Les 65 % perdus restent sous forme de chaleur un peu moins chaude.

Ce sont ces propriétés qui nous conduisent à parler d'énergie noble pour la première et d'énergie bâtarde (ou énergie dégradée) pour la seconde. Ainsi le pétrole, le charbon, le gaz ou les combustibles nucléaires sont des formes d'énergie bâtarde dans la mesure où on veut les transformer en énergie mécanique, puisqu'on ne peut guère récupérer que le 35 % de l'énergie mécanique qu'ils renferment. Par contre, ces combustibles peuvent restituer toute leur énergie si on se contente d'utiliser la chaleur qu'ils peuvent produire à des fins de chauffage (chauffage domestique, eau chaude, fours à ciment, métallurgie).

Nos principales sources d'énergie

Nous brûlons du charbon, du pétrole, et du gaz qui sont des énergies non renouvelables mais qui ont été produits il y a quelques centaines de millions d'années par l'énergie solaire. Le bois est issu d'une énergie solaire plus récente.

L'énergie hydraulique, les éoliennes et les panneaux thermiques et photovoltaïques provient presque de l'énergie solaire immédiate.

Il n'y a que l'énergie nucléaire et la géothermie qui ne dépendent pas du soleil. Ces diverses sortes d'énergie produisent de la chaleur pour les unes, de l'énergie mécanique pour les autres. Le tableau ci-dessous résume les qualités de ces diverses sources d'énergie.

Principales sources d'énergie utilisées par l'Homme		
Energie solaire fossile	charbon	Energie bâtarde
	pétrole	
	gaz	
Energie solaire récente	biomasse	
Energie solaire instantanée (ou presque)	énergie hydraulique	Energie noble
	éolienne	
	panneaux photovoltaïques	
	panneaux solaires thermiques	Energie bâtarde
Chaleur fossile et radioactivité naturelle	géothermie	
Energie de liaison des noyaux atomiques	énergie nucléaire	

Le cas ambigu des pompes à chaleur

Avant l'installation d'une pompe à chaleur vous chauffiez votre maison avec un combustible. Pour la pédagogie, divisons la quantité de combustible en trois tiers :

Chauffage classique (combustible):

$$\boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie bâtarde}} + \boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie bâtarde}} + \boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie bâtarde}}$$

Avec la pompe à chaleur vous n'utilisez plus qu'un tiers de l'énergie que vous dépensiez précédemment mais c'est une énergie mécanique, une pompe qui fonctionne à l'électricité.

Chauffage (électrique) au moyen d'une à pompe chaleur :

$$\boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie noble (électricité)}}$$

Mais aujourd'hui, en hiver, toute augmentation de la production d'électricité passe par des centrales thermiques dont le rendement n'excède pas 35 %. Pour produire cette électricité, il faut :

$$\boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie bâtarde}} + \boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie bâtarde}} + \boxed{\frac{1}{3} \text{ d'énergie bâtarde}}$$

Energie bâtarde nécessaire dans une centrale thermique pour produire le $\frac{1}{3}$ d'énergie noble (électricité) nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur.

Conclusion : si l'électricité qui fait fonctionner votre pompe à chaleur provient d'une centrale thermique, la consommation de combustible n'a pas changé ! Les seuls avantages sont la délocalisation de la pollution, le bénéfice substantiel de l'installateur ainsi que celui du fournisseur d'électricité !

Usage de l'énergie en Suisse

Le chauffage et le transport utilisent le 61% de l'énergie consommée en Suisse². Cette énergie est assurée principalement par les produits pétroliers, le gaz, le charbon, le bois et l'incinération des déchets.

La force motrice, l'éclairage et les usages domestiques représente environ 39% de la consommation. Cette part de l'énergie est assurée par l'électricité dont l'origine est nucléaire pour 26% et hydraulique pour 13 %.

On voit que la part des combustibles fossiles reste encore très importante et le chauffage des habitations l'hiver en est le principal responsable. L'isolation des habitations est encore la meilleure option à disposition pour diminuer cette part.

Les pompes à chaleur, comme nous venons de le voir, sont des chauffages électriques ! Si cette l'électricité est produite (en hiver) par des centrales thermiques dont le rendement n'excède pas 35% et si, en plus, elle est fournie par les centrales à charbon allemandes, le bilan est nettement négatif.

Quant au développement des véhicules électriques cela pose divers problèmes :

- l'autonomie est limitée et ne convient que pour de courts trajets quotidiens,
- la recharge nécessite une longue immobilisation du véhicule,
- la construction des batteries nécessite l'exploitation intensive de métaux peu fréquents : cobalt, lithium.

Par ailleurs, si ces véhicules permettent de diminuer la pollution, la demande d'électricité devrait augmenter.

L'énergie grise

Sous ce terme, on désigne la quantité d'énergie qui a été nécessaire pour produire un objet de consommation. Il faut tenir compte de cette valeur lorsqu'on envisage d'investir dans des travaux en vue de réaliser des économies d'énergie. Ainsi, lors de l'installation de panneaux solaires destinés à la production d'eau chaude, l'économie ne sera effective que lorsque la quantité d'énergie économisée, relativement à des sources conventionnelles, aura dépassé notablement la quantité d'énergie grise qu'il aura fallu pour construire et installer les panneaux. Ainsi une installation photovoltaïque consomme pour sa construction l'équivalent de trois ans de son fonctionnement.

La construction immobilière est un dévoreur d'énergie. L'énergie absorbée ne se limite de loin pas au fonctionnement des grues et des pelleteuses, mais c'est la fabrication des matériaux de construction qui consomme d'énormes quantités d'énergie. Le tableau montre l'énergie nécessaire à leur élaboration.

Energie grise nécessaire à la fabrication de divers matériaux de construction	
Béton armé	1850 kWh / tonne
Acier	12'000 kWh / tonne
Laine de verre	7.35 kWh / kg
Polystyrène expansé	29 kWh / kg
Pellets de bois	120 kWh / tonne

² Office fédéral de l'énergie, 2014

La construction d'une automobile, qu'elle soit à carburant ou électrique, nécessite aussi une quantité importante d'énergie³. Cette énergie grise, exprimée en litres de carburant, équivaut approximativement à la consommation d'essence nécessaire à ce véhicule pour parcourir 30'000 km., voire 50'000 km pour les véhicules les plus sophistiqués. Il en ressort que tout bien de consommation a nécessité de l'énergie pour sa production.

L'homme est terriblement dépendant de l'énergie

Si vous pédalez énergiquement sur un vélo d'appartement pendant une journée entière, vous aurez dépensé (ou produit si vous êtes relié à un générateur d'électricité) à peu près un kWh !

Or, pour notre confort d'occidental nous consommons, toutes énergies confondues (chauffage, transport, énergie grise), environ 100 kWh par jour !

Voilà notre véritable emprise sur l'environnement !

P.S. Cette conclusion ne reflète que mon opinion personnelle. Elle n'est pas forcément la vôtre, et les disputes entre tenants de divers scénarios pour assurer notre avenir énergétique me font penser aux anciennes guerres de religion !

³ Ces chiffres sont très difficiles à obtenir et on observe une certaine rétention d'information à ce sujet. Les estimations montrent que l'énergie grise d'un véhicule correspond à un parcours compris entre 25'000 et 50'000 km suivant le type de véhicule.