

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre universitaire de Rélizane Ahmed Zabana
Faculté Des sciences et de la Technologie ST
Département de Génie électrique



Polycopié de cours.

Titre : Production d'énergie électrique.

2^{eme} année licence académique.

Options :

Électrotechnique

Préparé par : Dr NAMOUNE Abdelhadi.

Année universitaire 2019/2020.

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre 1. Généralités sur historique de la production d'électricité

Chapitre 2. Les centrales thermiques

Chapitre 3. Les groupes électrogènes

Chapitre 4. Les centrales nucléaires

Chapitre 5. Les centrales hydrauliques

Chapitre 6. Energies éoliennes

Chapitre 7. L'énergie solaire

Chapitre 8. Les piles à combustible

Introduction générale

A notre époque, la vie quotidienne est difficilement envisageable sans électricité, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Il faut sans cesse prévoir la demande en énergie électrique nécessaire actuelle et future et prévoir les installations nécessaires (Centrales, Lignes, Postes, Eléments de protections etc...) ainsi que les investissements qui les accompagnent afin de répondre à cette demande.

L'énergie électrique n'est pas une énergie primaire, il faut une autre énergie en amont pour la produire. L'énergie électrique peut être produite par le nucléaire (centrale nucléaire) ou par des centrales thermiques utilisant les énergies fossiles (gaz et le fioul). Elle peut être aussi produite par les énergies renouvelable, comme l'hydro-accumulateur utilisant les barrages, la force du vent (éolienne), le photovoltaïque (panneaux photovoltaïques), rayonnement solaire (accumulateur de chaleur par rayonnement), ou bien par des pompes à chaleur utilisant des sources géothermales etc....

En Algérie, avec le développement démographique et économique la production d'énergie électrique n'a pas cessé d'augmentée, passant de 568 MW en 1962 à 15160 MW en 2013[1]. La demande en énergie et particulièrement en énergie électrique va augmenter et s'accroître d'avantage, car l'Afrique et l'Algérie particulièrement vont connaître une croissance économique importante. Les capacités de production actuelles sont insuffisantes pour satisfaire cette augmentation particulièrement en périodes de pics et de fortes consommations.

L'Algérie n'a pas d'autres choix que celui de se préparer pour faire face à cette augmentation sans cesse croissante. Un plan d'investissement à moyen et long terme est indispensable. Ce plan doit être justifié par une étude des potentialités des différents types de production d'énergie électrique possibles, sur tout le territoire national que ce soient des ressources hydrauliques (barrages, bassins versant, lacs, ...), d'ensoleillement de chaque parcelle (centrales PV et par rayonnement), des couloirs de vent (éoliennes), des sources géothermales (centrales géothermique), des ressources gazières et pétrolières etc... Les études permettront un choix judicieux et approprié du type des centrales, des postes et des lignes à installer et de l'endroit adéquat à cette installation. Cela doit être accompagné par une étude technico-économique avec des critères respectant l'environnement en réduisant la pollution et en prenant en compte que les énergies fossiles sont épuisables.

I. Historique de la production d'énergie

En parcourant cette frise chronologique, tu découvriras les grandes étapes qui ont marqué l'histoire de l'énergie, de la préhistoire à nos jours : la domestication du feu, les débuts de l'agriculture, les premiers fours à bois, les moulins à vent ou les machines à vapeur, l'invention de la pile électrique ou des centrales nucléaires.

➤ La préhistoire

Il y a 500 000 ans L'homme domestique le feu. Il utilise l'énergie du bois pour faire cuire ses aliments, se chauffer, s'éclairer, se protéger des bêtes sauvages ou durcir ses pointes de flèche.

Il y a 20 000 ans Les hommes préhistoriques fabriquent de petites lampes à huile, fonctionnant avec de la graisse animale et une mèche en mousse. Elles leur permettent de s'éclairer pour peindre dans les grottes

Il y a 10 000 ans C'est le début de l'agriculture : l'homme utilise la force des animaux pour labourer les champs ou accomplir les travaux pénibles

Il y a 4 500 ans Il faut la force de milliers d'esclaves pour construire les pyramides d'égypte

Il y a 4 000 ans L'homme invente le four à bois.

➤ L'Antiquité

Au 1^{er} siècle Les Romains inventent le moulin à eau pour moudre le grain grâce à l'énergie hydraulique

Au XII siècle L'homme invente le moulin à vent pour moudre le grain grâce à l'énergie éolienne

Le XVIII siècle Au début du XVIII siècle Thomas Newcomen, Thomas Savery et Denis Papin inventent la machine à vapeur ; c'est le début de l'ère industrielle. La locomotive à vapeur permet le développement des chemins de fer, facilitant le déplacement des voyageurs et des marchandises.

En 1720 On découvre un gisement de charbon à Fresnes, dans le nord de la France. En 1770 Nicolas-Joseph Cugnot invente le premier véhicule automobile. Il fonctionne à vapeur et sert à transporter les canons.

Le XIX siècle

En 1800

- L'Italien Alessandro Volta invente la pile électrique.

- Les réverbères servant à l'éclairage public fonctionnent au gaz.

En 1821 L'Anglais Michael Faraday crée le premier moteur électrique.

En 1859 Le premier puits de pétrole est exploité aux États-Unis.

Le 19 juin 1862 Inauguration à Genève de la première ligne de tramways hippomobiles (tirés par des chevaux), qui relie la place Neuve à Carouge.

En 1878 Début des trams à vapeur à Genève

En 1882

- L'ingénieur Théodore Turrettini crée la Société d'appareillage électrique à Genève.
- L'Américain Thomas Edison invente l'ampoule électrique.

En 1886 L'usine des Forces motrices est construite. Elle remplace les moulins à eau, qui perturbent l'écoulement naturel du Rhône et provoquent des inondations sur les berges du lac.

En 1894 La première ligne de tramways électriques relie Champel au Petit-Saconnex, sur les berges du lac.

En 1895 Inauguration de l'usine hydroélectrique de Chèvres.

En 1897 Poul La Cour invente la première éolienne produisant de l'électricité.

Le XX siècle

En 1903 Les frères Wright font voler le premier avion à hélices aux états-Unis.

En 1943 Entrée en fonction du barrage de Verbois et fin de l'activité de l'usine de Chèvres

En 1955 La première centrale nucléaire voit le jour à Calder Hall, aux États-Unis. Elle est aujourd'hui désaffectée

Le XXI siècle

En 2011 Inauguration de la plus haute éolienne d'Europe à Gries (Valais).

En 2012 Inauguration de la deuxième plus grande centrale solaire de Suisse sur les toits de Palexpo, à Genève

II. Historique de l'évolution de la production de l'énergie électrique en Algérie

1947 : Création de Electricité et Gaz d'Algérie (EGA) :

L'entreprise EGA créée en 1947 détenait le monopole de la production, du transport, de la distribution de l'énergie électrique à travers tout le territoire algérien.

1969 : Création de la Société Nationale de l'Electricité et du Gaz « SONELGAZ » :

Par ordonnance n° 69-59 du 26 juillet 1969, portant dissolution d'« Electricité et Gaz d'Algérie » et création de la société nationale de l'électricité et du gaz, la Société Nationale de l'électricité et du Gaz (SONELGAZ) est créée en substitution à EGA dissoute par ce même décret. Le monopole de la production, du transport, de la distribution, de l'importation de l'énergie électrique attribué à SONELGAZ a été renforcé. De même, SONELGAZ s'est vue attribuer le monopole de la commercialisation du gaz naturel à l'intérieur du pays, et ce pour tous les types de clients (industries, centrales de production de l'énergie électriques). Pour ce faire, elle réalise et gère des canalisations de transport et un réseau de distribution.

1983 : RESTRUCTURATION DE SONELGAZ :

Toutes les unités SONELGAZ de travaux et de fabrication de matériels, créées pour palier au manque de capacités nationales, ont été transformées en 1983 en entreprises autonomes. C'est ainsi que Kahrif, Khanagaz, Inerga, Etterkib, Kahrakib et AMC ont été créées et relèvent de Sociétés de Gestion de Participations de l'Etat (SGP).

1991 : NOUVEAU STATUT DE SONELGAZ :

SONELGAZ change de nature juridique par décret exécutif n° 91-475 du 14 Décembre 1991, portant transformation de la nature juridique de la société nationale d'électricité et du gaz en Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC).

1995 : SONELGAZ EPIC :

Le décret exécutif n° 95-280 du 17 Septembre 1995 portant statuts de l'établissement public à caractère industriel et commercial « SONELGAZ » confirme la nature de SONELGAZ en tant qu'Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial. SONELGAZ est placé sous tutelle du Ministre chargé de l'énergie et des mines et doté de la personnalité morale tout en jouissant de l'autonomie financière.

Juin 2002 : SONELGAZ devient SPA :

Le décret présidentiel n° 02-195 du 1^{er} juin 2002 a transformé l'EPIC SONELGAZ en holding de sociétés par actions dénommé SONELGAZ.Spa qui exerce par le biais de ses filiales les activités de production, de transport et de distribution de l'électricité et de transport et de distribution du gaz.

La loi n° 02-01 du 5 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation stipule dans son article 165 que « l'Etat est, et demeurera, l'actionnaire majoritaire de SONELGAZ Spa ».

La loi sur l'électricité et la distribution du gaz par canalisation, consacre la démonopolisation de la production de l'électricité et la distribution du gaz par canalisation, les activités de production d'électricité sont désormais ouvertes à la concurrence.

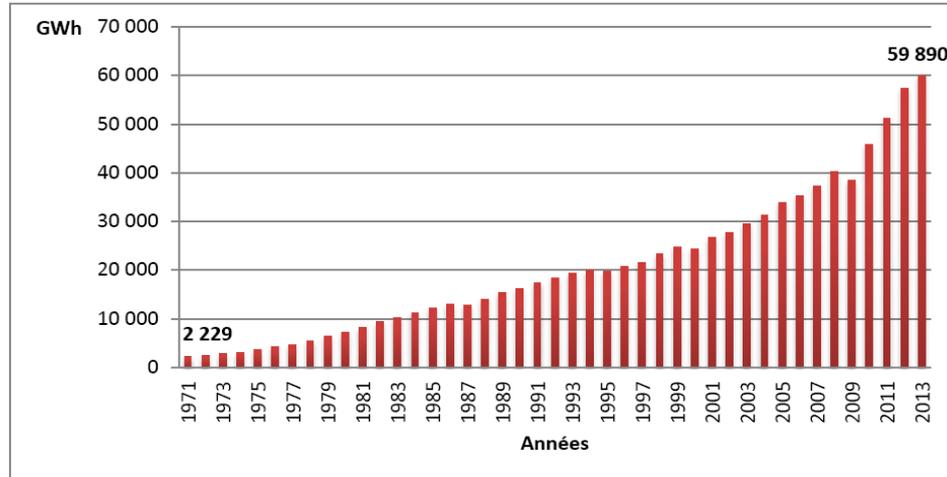
L'introduction de la concurrence dans le secteur de l'énergie n'est pas incompatible avec les impératifs du service public.

En effet, il est institué de nouveaux mécanismes permettant de prendre en considération la mission et les obligations du service public dans l'intérêt socio-économique général.

Dans ce cadre, la loi stipule que la distribution de l'électricité et du gaz est une activité de service public en précisant les objectifs, les opérateurs et les modalités de son financement. Les mesures qui sont édictées visent la sécurité, la continuité et la qualité de la fourniture, la politique tarifaire ainsi que la protection de l'environnement.

Evolution de La production et de la consommation électrique (1971-2013)

La production algérienne de l'énergie électrique a connu une forte évolution, et cela est engendré par le développement démographique, économique, social..., et cela est affirmé par la figure suivante :



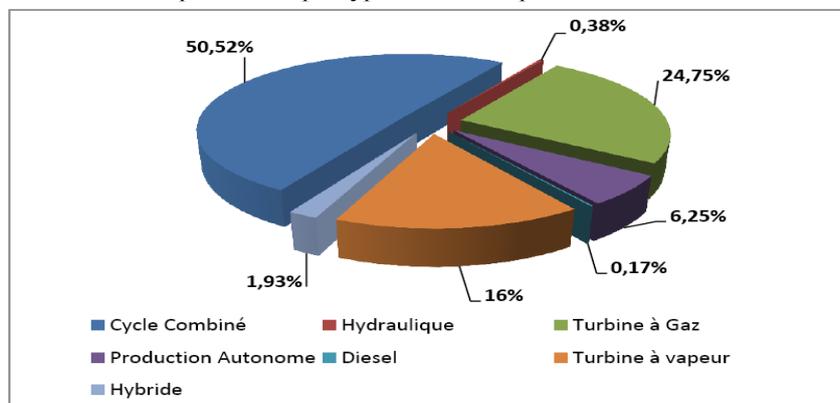
Evolution de la production d'électricité en G

Pour l'année 2013, la production totale d'énergie électrique a atteint 59 890 GWh qui a été donnée par les différents types de centrales comme le montre le tableau suivant :

Répartition de la production par type des centrales en 2013.

1- Par Type de production	Production (GWh)	Structure (%)
Turbine Vapeur	9 582	16
Cycle Combiné	30 255	50.52
Turbine Gaz	14 829	24.75
Hydraulique	99	0.17
Diesel	228	0.38
Centre Hybride	1 155	1.93
Production Autonome	3 742	6.25
Production Totale	59 890	100

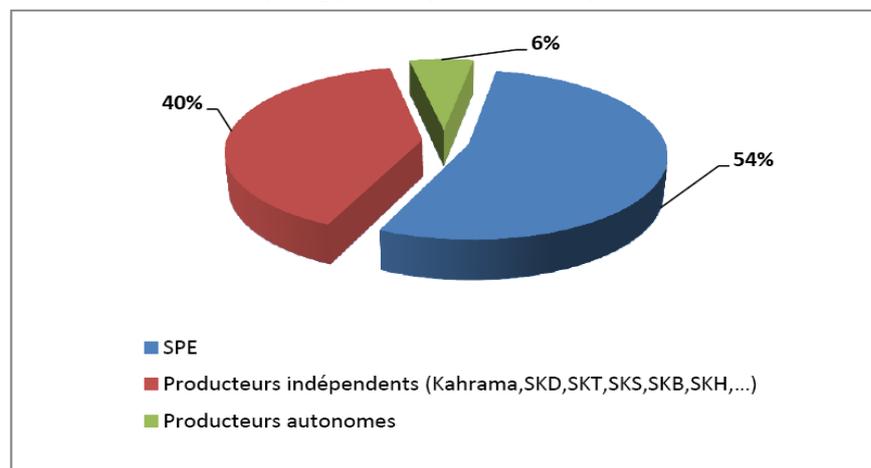
La production par type de centrale pour l'année 2013.



Répartition de la production par producteur pour l'année 2013.

2- Par Producteur	Production (GWh)	Structure (%)
SPE	23 632	40
Producteurs Indépendants (Kahrama, SKD, SKS, SKT, ...)	32 516	54
Producteurs Autonomes	3 742	6
Production Totale	59 890	100

La production par types de producteurs pour l'année 2013.



Le groupe Sonelgaz a annoncé que la capacité de production installée d'électricité en Algérie a atteint 15,16 GW en 2013 contre 12,94 GW une année auparavant, soit une évolution de 14,64%. L'année 2013 qui a connu le lancement du plan de renforcement des capacités de production d'électricité a été également marqué par l'acquisition, par les filiales de Sonelgaz, d'une cinquantaine d'installations et équipements de production d'électricité totalisant une puissance de 650 MW.

L'augmentation a concerné :

- La mise en service de 32 centrales turbines à gaz mobiles d'une puissance globale de 616 MW et de quatre (4) centrales turbines à gaz (20 MW).
- La mise en production de la centrale de Koudiet Draouche dans la wilaya d'El Tarf a permis, quant à elle, de mettre en place une puissance supplémentaire de 1,2 GW.

De même, la nouvelle filiale de Sonelgaz en charge des réseaux isolés du sud et des énergies renouvelables (SKTM) a, de son côté, contribué avec une puissance de près de 30 MW provenant de 13 groupes diesel, dont 12 autonomes sur site et une mobile.

Au total, 63 installations et équipements de toutes tailles de production ont été mis en service avec une capacité totale de 1,88 GW, selon le bilan de Sonelgaz.

L'année 2013 a été caractérisée par le renforcement du parc de production de la filiale SPE comme suit :

- Quatre (04) TG à la centrale TG mobiles d'Amizour (92 MW)
- Quatre (04) TG mobiles à la centrale d'El Oued (92 MW)
- Quatre (04) TG mobiles à la centrale de Hassi Messaoud Ouest (92 MW)
- Douze (12) TG mobiles à la centrale de M'Sila 4 (260 MW)
- Douze (12) TG mobiles à la centrale de F'Kirina (260 MW)
- Deux (02) TG mobiles à la centrale d'Adrar (46 MW)
- 6ème TG à la centrale d'In Amenas (05 MW)
- Trois (03) TG à la centrale d'Illizi (15 MW).

2013 a connu aussi l'ouverture des chantiers de réalisation de quinze ouvrages de production pour le compte de SPE [19]. Il y a lieu de citer en particulier les ouvrages importants notamment pour le réseau interconnecté nord :

- Centrales TG : Hassi R'Mel (1) 300 MW, Boufarik 600 MW, Oumache (Biskra) 600 MW et Hassi R'Mel (2) 600 MW,
- Centrales TG mobiles : F'Kirina (240 MW), M'Sila (240 MW), Amizour (156 MW), 20 turbines à gaz mobiles d'une puissance globale de 393 MW pour les sites de Béni Mered, Boufarik, Ouargla et M'Sila, 18 TG mobiles de 17 MW chacune pour le site d'Adrar (2*17MW),
- Centrales en cycle combiné : Jijel (1 300 - 1 600 MW), Ras Djinet (1 131 MW), Ain Arnat (1 015 MW).

Une augmentation notable de la consommation d'électricité est relevée sur la période 1962-2011. A noter que de 1962 à 2011, la capacité de production d'électricité est passée de 500 MW à 11,389 MW (augmentation de 22 fois la capacité de production en cinquante ans).

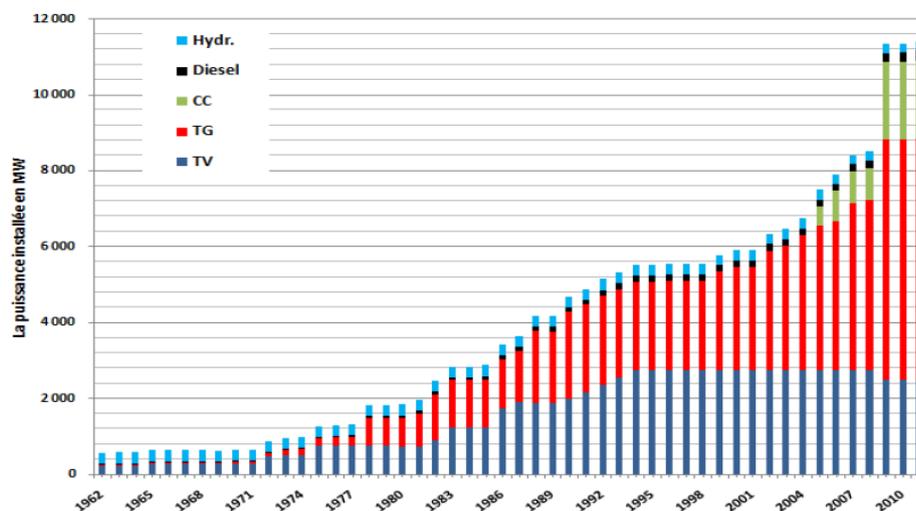


Figure : Puissance électrique installée par technologie pour la période 1962-2011.

La figure suivante présente la production d'énergie électrique par technologie pour la période 1962-2011.

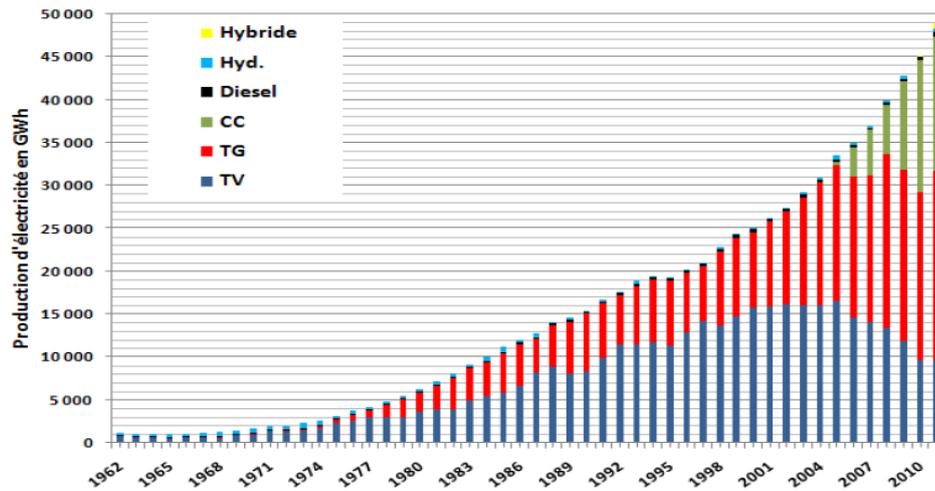


Figure : Production d'énergie électrique par technologie pour la période 1962-2011.

La production d'énergie électrique pour l'année 2013 a atteint environ 56,160 GWh. La figure suivante montre l'évolution de la production d'énergie électrique et les technologies de production de 1979 à 2013. La production a augmentée de 14,853 GWh entre 1978 et 1991. Pour les 22 années suivantes (de 1991 à 2013), la production d'énergie électrique a connue une augmentation plus importante (plus que le double 39,410 GWh) par rapport aux 12 ans précédent (1978 à 1991). La période entre 1991 et 2013 est caractérisée par l'introduction d'autres technologies de production telles que les centrales à cycles combinés et une centrale hybride avec une puissance totale de 150 MW située à Hassi R'mel.

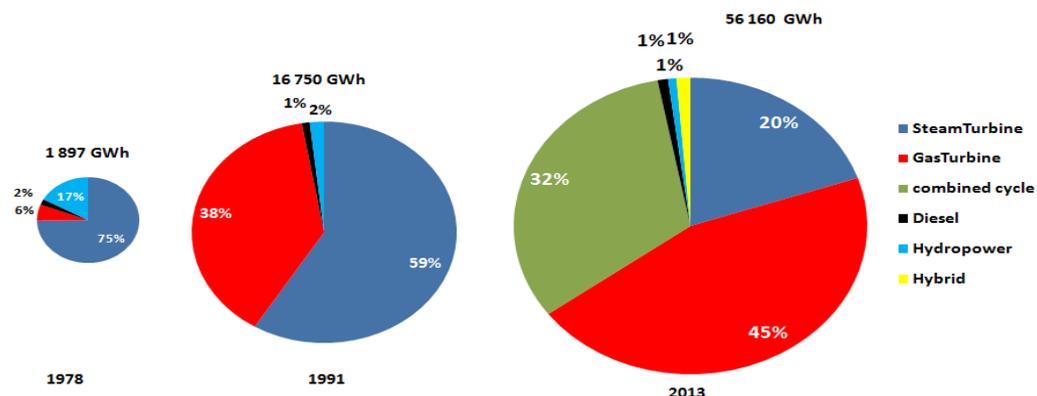


Figure : Evolution de la production d'énergie électrique en GWh, a) 1978, b) 1991, c) 2013.

La répartition spatiale du parc de production de l'énergie électrique algérien est représentée sur la figure ci-dessous. Les noeuds de ce réseau sont les centrales thermiques, représentées par des boules avec différents couleurs et différentes tailles en fonction de leur type et de leur puissance;

et les parcs hydrauliques, représentés en couleur bleu. Chaque nœud est caractérisé par ses coordonnées géographiques (longitude et latitude), nom de la centrale (ou du site), nombre des turbines, puissance électrique en MW, type de turbine ...etc.

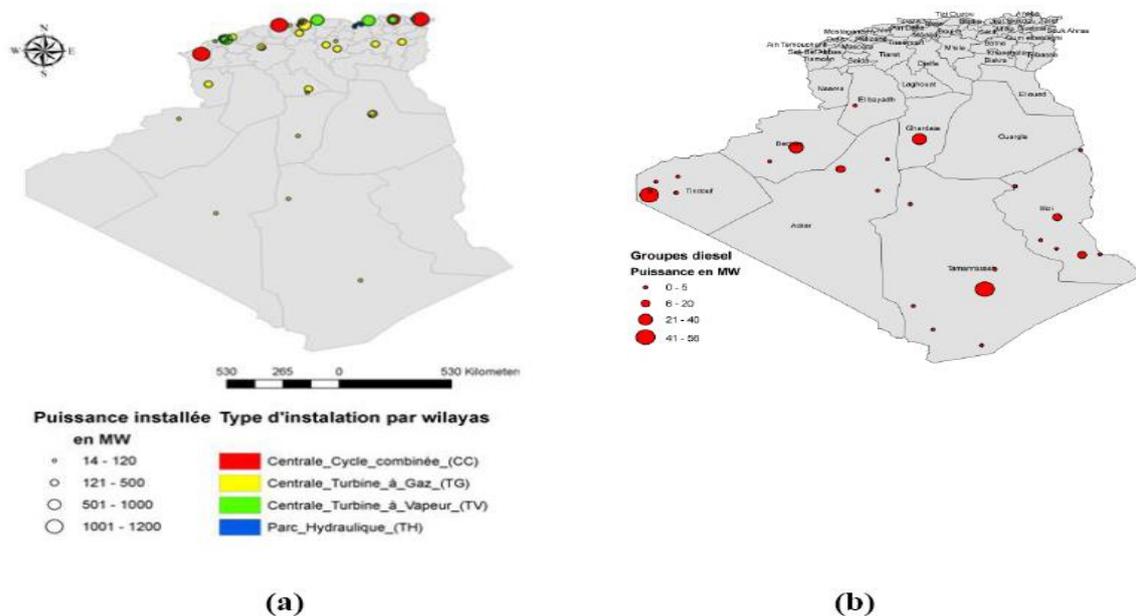


Figure : Caractéristiques du parc de production d'énergie électrique élaboré sous a) centrales électriques, b) groupes électrogènes.

En Algérie, 99% la production électrique est issue du combustible fossile, la part qui reste (0.8%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydroélectrique.

La figure montre les grandes régions de production d'énergie électrique qui sont localisées au Nord de l'Algérie et réparties principalement sur trois pôles; les régions situées à l'est, ouest et au centre présentés dans un ordre décroissant de capacité de production. Au sud du pays une capacité moins importante est installée, présenté par des groupes électrogènes utilisés pour la génération d'électricité dans les régions isolées.

Introduction :

Lorsque l'on parle de production électrique, il est courant que les termes « thermique » et « fossile » soient rapprochés. Or, une centrale thermique est une centrale qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur mais pas nécessairement à partir d'un combustible fossile.

Le fonctionnement d'une centrale thermique consiste à produire de la **vapeur** qui actionne **une turbine** couplée à **un alternateur**. On distingue **3 types** de centrales thermiques selon l'origine de la source de chaleur :

- les centrales exploitant de la chaleur issue de l'énergie nucléaire** : la chaleur provient actuellement de la fission de noyaux d'uranium 235 ou de plutonium 239 ;
- les centrales exploitant de la chaleur « renouvelable »** : la chaleur peut-être issue du sous-sol (centrales géothermique) ou du rayonnement du Soleil que l'on concentre (centrales solaires thermodynamiques) ;
- les centrales, dites « à flamme », exploitant de la chaleur issue de la combustion d'un composé carboné** : le combustible, brûlé dans une chaudière, est souvent fossile (centrales à charbon, à gaz, au fioul). Les centrales à biomasse et celles brûlant des déchets (industriels, agricoles ou ménagers) font toutefois également partie de cette catégorie de centrales.

I. Les centrales thermiques à flamme

Qu'est-ce que l'énergie thermique ?

L'énergie thermique à flamme dépend de combustibles fossiles (charbon, gaz ou pétrole), des éléments contenus dans le sous-sol de la Terre. Elle permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales thermiques à flamme appelées aussi centrales à flamme ou centrales thermiques classiques, grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces éléments.

Une centrale thermique à flamme est composée de 3 parties :

- la **chaudière** dans laquelle est brûlé le combustible ;
- la **salle des machines** où est produite l'électricité ;
- les **lignes électriques** qui évacuent et transportent l'électricité.

Dans certains pays, ces centrales ont été utilisées comme moyen de production de base de l'électricité. Avec le développement de l'énergie nucléaire, elles sont aujourd'hui utilisées comme moyen pour répondre aux pics de consommation aux heures de pointe ou lors de périodes de froid. L'énergie thermique à flamme est la plus utilisée dans le monde car le charbon est abondant, mais elle émet beaucoup de gaz à effet de serre.

Comment fonctionne une centrale thermique à flamme ?

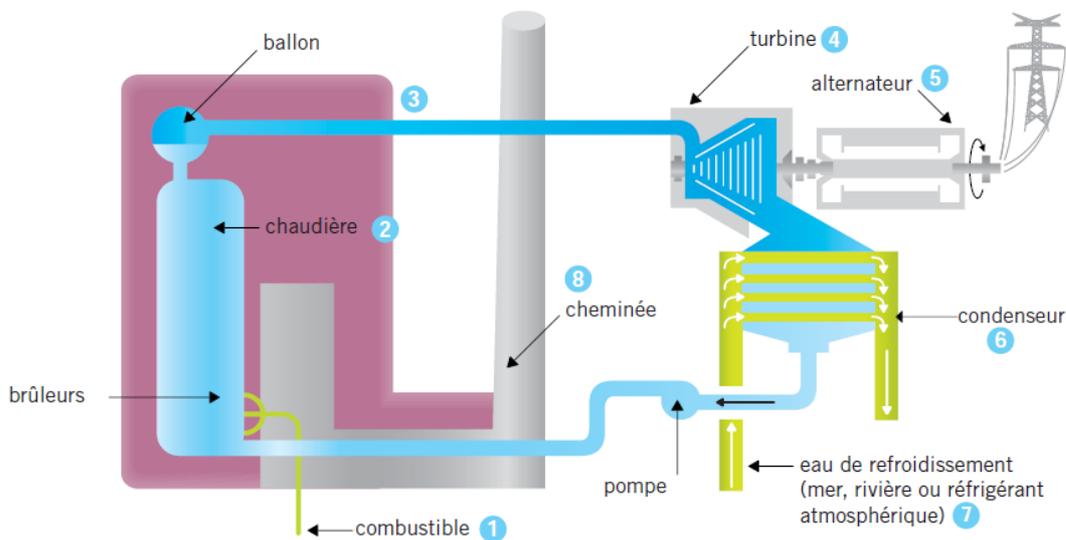
Une centrale thermique à flamme produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz, de charbon ou de fioul, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

LE PRINCIPE

La centrale à flamme produit de la vapeur pour faire tourner un alternateur, qui est une machine rotative convertissant en énergie électrique l'énergie mécanique fournie par un moteur.

Quel que soit le combustible (1), celui-ci brûle dans une chaudière (2) – pouvant atteindre 90 mètres de hauteur et un poids de 9 000 tonnes – tapissée de tubes à l'intérieur desquels circule l'eau à chauffer. Sous l'effet de la chaleur, l'eau se transforme en vapeur, laquelle est alors envoyée (3) sous pression vers les turbines. Les turbines (4) tournent grâce à la vapeur.

Elles entraînent un alternateur (5) qui produit de l'électricité à une tension de 20 000 volts. L'électricité est injectée sur le réseau après avoir été portée à 225 000 volts, ou à 400 000 volts, à l'aide d'un transformateur de puissance. La vapeur qui a été utilisée est envoyée vers un condenseur (6), dans lequel circule de l'eau froide. Au contact de celle-ci, elle se transforme en eau, qui est récupérée et envoyée à nouveau dans la chaudière. L'eau utilisée pour le refroidissement (7) est restituée au milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur.



1. La combustion

Un **combustible (gaz, charbon, fioul)** est **brûlé** dans les brûleurs d'une chaudière pouvant mesurer jusqu'à 90 m de hauteur. Le charbon est d'abord réduit en poudre, le fioul est chauffé pour le rendre liquide puis vaporisé en fines gouttelettes et le gaz est injecté directement sans traitement préparatoire.

2. La production de vapeur

Chapitre 2. Les Centrales Thermiques

La chaudière est tapissée de tubes dans lesquels circule de l'eau froide. En brûlant, le combustible dégage de **la chaleur** qui va chauffer cette eau. L'eau se transforme **en vapeur**, envoyée sous pression vers les turbines.

3. La production d'électricité

La vapeur fait tourner une **turbine** qui entraîne à son tour un **alternateur**. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension.

4. Le recyclage

À la sortie de la turbine, **la vapeur** est à nouveau **transformée en eau** grâce à un **condenseur** dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et **re-circule dans la chaudière** pour recommencer un autre cycle.

CONDENSEUR : Structure composée de milliers de tubes de petit diamètre dans lesquels circule l'eau de refroidissement, généralement prélevée dans une rivière ou en mer, au contact desquels la vapeur va se refroidir et prendre une forme liquide, par condensation.

- L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée à son milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur.
- Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des **cheminées**.

Les différents types de centrales thermiques

Il existe 3 types de centrales thermiques.

La centrale classique

C'est le type le plus répandu et le plus ancien. Il utilise **des combustibles fossiles** et fonctionne avec une chaudière à vapeur. Chaque chaudière ne peut utiliser qu'un seul type de combustible car chacun exige un brûleur spécifique.

Il en existe 3 sortes, suivant le combustible utilisé :

Thermique au charbon

Pour pouvoir être utilisé, le charbon est transformé en fines particules dans un broyeur, puis mélangé à de l'air réchauffé avant d'être introduit sous pression dans le brûleur de la chaudière.

Thermique au fioul

Le fioul, trop visqueux pour être utilisé tel quel, doit être liquéfié en le chauffant avant de l'injecter dans les brûleurs. Il a longtemps été le principal combustible utilisé dans les centrales à flamme, mais il a été remplacé par le charbon après le choc pétrolier de 1973.

Thermique au gaz

Chapitre 2. Les Centrales Thermiques

Naturel ou récupéré des hauts fourneaux, il est utilisé tel quel.

La Turbine à Combustion (TAC) à Cycle Combiné

Les centrales de ce type **associent une TAC (Turbine à Combustion) et une turbine à vapeur TAV**. Les combustibles brûlés sont **du gaz ou du fioul**.

1. De l'air prélevé dans l'atmosphère est fortement comprimé par un compresseur, ce qui augmente sa pression et sa température.
2. Il pénètre ensuite dans la chambre de combustion, dans laquelle est injecté du fioul ou du gaz. Ce mélange gazeux est porté à plus de 1 000 °C.
3. Il dégage ainsi beaucoup d'énergie pour faire tourner une TAC. La TAC entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.
4. La chaleur des gaz d'échappement de la TAC est transformée en vapeur par le biais d'un générateur de vapeur.
5. La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne son propre alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.

Cette technologie demande un investissement plus faible que d'autres types de centrales conventionnelles de puissance plus forte et assure un rendement énergétique nettement supérieur à celui d'une centrale thermique classique (65 % contre 38 %).

Ce type de centrale peut être **facilement implanté au plus près des lieux de consommation** (zones urbaines, installations industrielles).

À Lit Fluidisé Circulant (LFC)

Elles fonctionnent comme une centrale à flamme classique mais elle émet moins d'oxydes d'azote et de soufre, grâce à l'ajout de calcaire dans la chaudière et à une température de combustion plus basse.

Elles utilisent du **charbon** mais aussi du **lignite**, de la **tourbe** et divers résidus industriels.

Le fonctionnement d'une centrale thermique à Cycle Combiné Gaz

Une centrale thermique à Cycle Combiné Gaz associe une turbine à combustion et une turbine à vapeur.

Découvrez tout ce qu'il faut savoir sur son fonctionnement et sur ses avantages.

Une centrale thermique à **Cycle Combiné Gaz (CCG)** produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz naturel. Ce type de centrale combine deux types de turbine : une turbine à combustion et une turbine à vapeur reliées à un alternateur. Avec le même volume de combustible, ces deux turbines permettent de produire une quantité plus importante d'électricité.

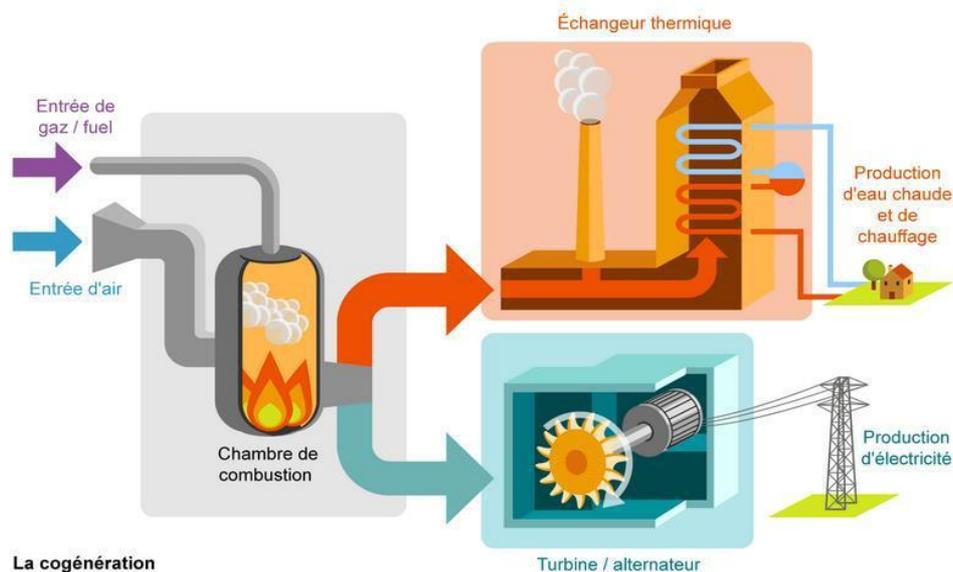
Chapitre 2. Les Centrales Thermiques

Grâce à l'utilisation du gaz naturel comme combustible, les émissions de CO₂ sont divisées par 2 par rapport à une centrale au charbon. Flexible et réactive, une centrale à cycle combiné a un rendement supérieur à celui des centrales thermiques classiques. Capable de monter à pleine puissance en moins d'une heure, elle répond aux fortes variations de consommation, notamment pendant les jours de grand froid.

La cogénération

La cogénération consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie thermique à flamme et de l'énergie mécanique.

- La chaleur est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude à l'aide d'un échangeur.
- L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur.
- Les installations fonctionnent au gaz, au fioul, avec toute forme d'énergie locale (géothermie, biomasse...) ou liée à la valorisation des déchets (incinération des ordures ménagères...).
- Elles ont un excellent rendement énergétique, mais elles doivent produire au plus près des lieux de consommation en raison des pertes pendant le transport de chaleur.



Présentation d'un groupe électrogène :

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui actionne un alternateur. Sa puissance est donnée en kVA.

Les groupes électrogènes sont utilisés dans les zones que le réseau de distribution électrique ne dessert pas ou comme source de secours lors d'une coupure d'alimentation électrique.

Il représente pour l'installation une sorte de sécurité et source de remplacement en cas de défaillance des deux autres sources, si un black-out ou coupure générale se produit, il est nécessaire d'assurer l'alimentation des importants équipements.

Le groupe électrogène délivre une tension de 10kV qui alimente à travers un disjoncteur moyenne tension (MT) le tableau moyenne tension de l'atelier centrale.

Un groupe électrogène est principalement constitué des éléments suivants et qui seront présentés dans les paragraphes qui suivent :

- Un moteur thermique, fonctionnant au diesel, de forte puissance
- Un alternateur entraîné par le moteur
- Un coffret de commande
- un groupe compresseur
- Un groupe moto compresseur

1. Moteur diesel :

Le moteur diesel S 12 R du groupe électrogène est constitué principalement des unités suivantes nécessaires au fonctionnement du moteur :

Unité de pression d'huile : installée au-dessus du filtre à huile, elle mesure la pression d'huile du moteur.

Unité de température du liquide de refroidissement : située sous le couvercle du thermostat, elle détecte la température du liquide de refroidissement.

Les dispositifs de protection du moteur sont très importants puisqu'ils actionnent une alarme ce qui oblige d'arrêter le moteur.

Les dispositifs de protection installés dans le moteur sont les suivants :

Contacteur de pression d'huile : il s'active pour générer une alarme quand la pression d'huile de lubrification du moteur descend au-dessous du niveau prédéfini. Le contacteur peut s'activer quel que soit le régime moteur.

Contacteur de filtre d'huile : il s'active et générer une alarme quand les filtres à huile s'encrassent et quand la différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre à huile atteint la limite.

Chapitre 3. Les Groupes Electrogènes

Contacteur de température : Un contacteur de température est installé pour éviter une surchauffe. Le contacteur de température génère une alarme audible quand la température du liquide de refroidissement atteint un niveau spécifié.

Indicateur d'encrassement du filtre air : l'indicateur déclenche si l'élément du filtre air est encrassé c'est à dire qu'il faut le nettoyer.

Les composants du moteur diesel sont présentés dans les figures 1 et 2 suivantes :

Vue de droite

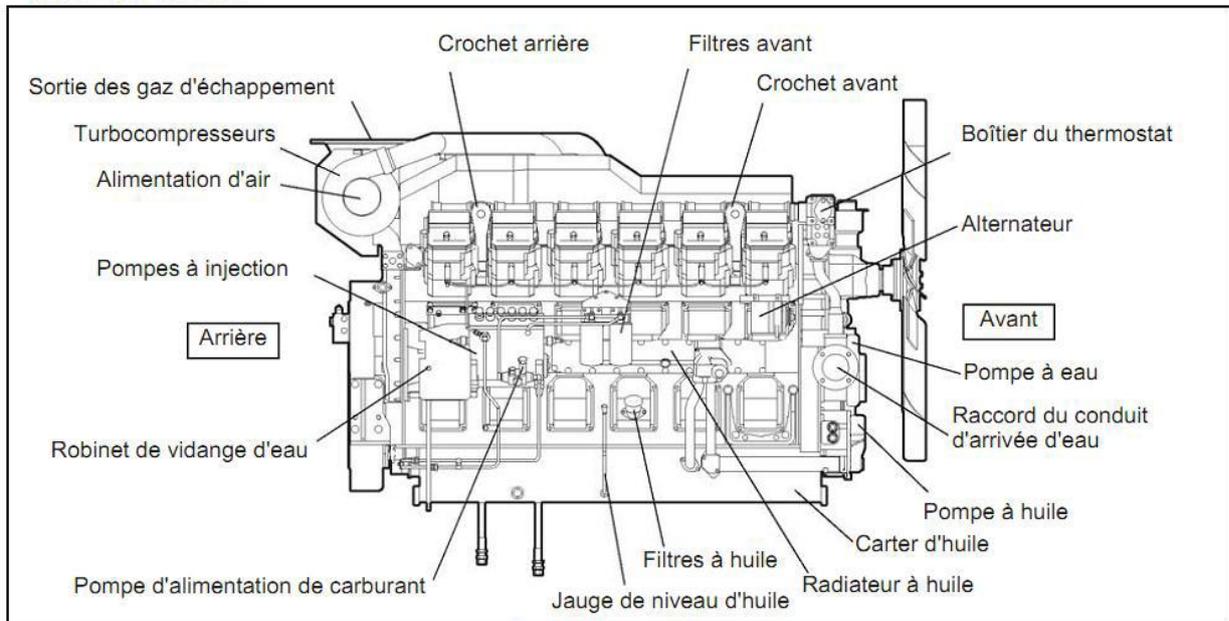


Figure 1: vue droite du moteur diesel

Vue de gauche

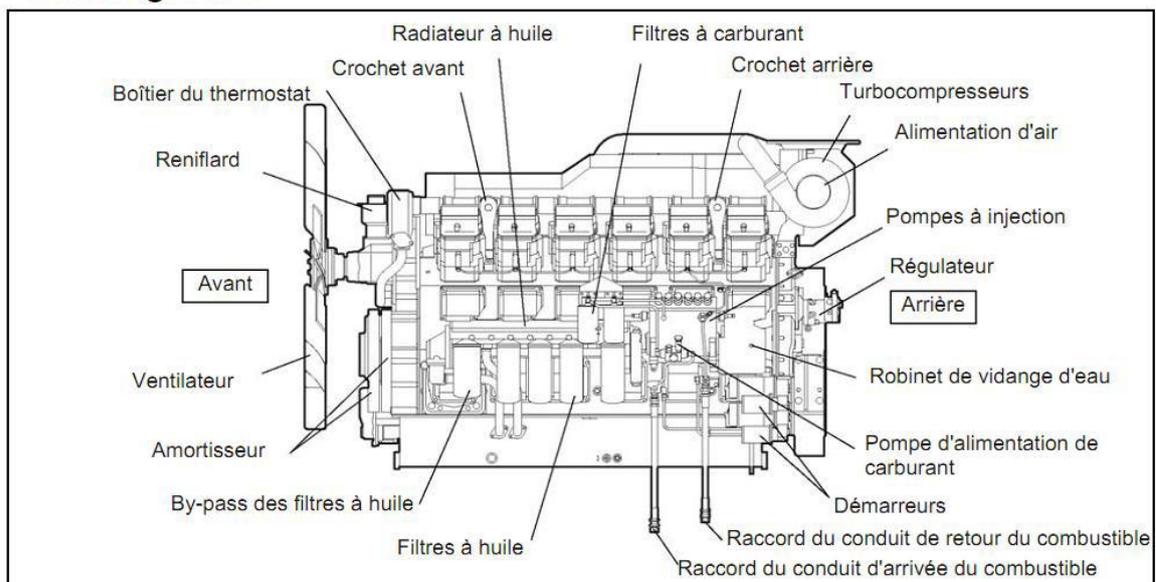


Figure 2: vue gauche du moteur diesel

2. Alternateur :

Chapitre 3. Les Groupes Electrogènes

L'alternateur est une machine synchrone à courant alternatif, sans balai.

Son système d'excitation est constitué de 2 ensembles :

1. L'induit d'excitateur : il génère un courant triphasé associé avec le pont redresseur triphasé (qui est constitué de six diodes) fournit le courant d'excitation à la roue polaire de l'alternateur. L'induit de l'excitation et le pont redresseur sont montés sur l'arbre de l'alternateur et sont électriquement interconnectés avec la roue polaire de la machine.
2. L'inducteur de l'excitateur « stator » est alimenté en courant continu par le système de régulation de tension AVR

Sous ensembles :

- Stator: comprend des tôles magnétiques acier à faibles pertes, assemblées sous pression. Les tôles magnétiques sont bloquées axialement par un anneau soudé. Les bobines du stator sont insérées et bloquées dans les encoches puis imprégnées de vernis et polymérisées.

L'inducteur d'excitateur comprend un élément massif et un bobinage.

Le système d'excitation est fixé sur le palier arrière de la machine. Le bobinage est constitué de fils de cuivre.

- Rotor: la roue polaire comprend un paquet de tôles d'acier, découpées et frappées pour reproduire le profil des pôles saillants. L'empilage des tôles est terminé par des tôles de grande conductivité électrique.

3. Coffret de commande :

Le système MICS Kerys est composé d'un ensemble de modules électroniques, dans lequel chaque module remplit une fonction bien définie.

Ces modules sont connectés entre eux, suivant une architecture très précise, et s'échangent des données pour permettre ; la commande, le contrôle, la régulation et la protection d'un ou de plusieurs groupes électrogènes, suivant de multiples configurations.

Le système MICS Kerys se compose des modules suivants :

- module interface homme/machine appelé encore module IHM,
- module de base (coeur du système),
- module de régulation,
- module de protection,
- module d'entrées/sorties logiques,
- module d'entrées/sorties analogiques,
- module d'entrées température.

L'écran du coffret permet d'afficher les mesures électriques du groupe :

Chapitre 3. Les Groupes Electrogènes

La tension de la batterie de démarrage, la puissance active par phase, la puissance active totale, la puissance réactive par phase, la puissance réactive totale, l'énergie active fournie et l'énergie réactive fournie comme le montre la figure 3 suivante :

15/10/2003	00 : 00 :00	GE 1	Mesures électriques		Stop	Défauts	Alarmes
			01				
U12(V)	0	I1(A)	0	P1(kW)	0	Q1(kvar)	0
U23(V)	0	I2(A)	0	P2(kW)	0	Q2(kvar)	0
U31(V)	0	I3(A)	0	P3(kW)	0	Q3(kvar)	0
F.P.	0L	F(Hz)	0	PT(kW)	0	QT(kvar)	0
UBat(V)	0						
-1- Mesures électriques JDB/Réseau(x)		- 2 - Mesures mécaniques		- 4 - Harmoniques			

Figure 3: Afficheur de coffret de commande

4. Sécheur d'air :

L'air comprimé est déshydraté lors de son passage à travers un produit absorbant l'ALLUMINE. Ce dernier est constitué par des corps microporeux. Il se présente sous formes de billes assurant un contact important avec l'air à traiter de la surface.

Ce sécheur est composé de 2 réservoirs d'une capacité unitaire de 10 l. Le premier réservoir est équipé d'une soupape de sureté, d'une vanne de purge manuelle et en option d'une électrovanne de purge automatique, reçoit l'air provenant d'un compresseur et en sépare les gouttes d'eau et d'huile en suspension afin d'éviter la pollution rapide du produit déshydratant. L'air passe ensuite dans second réservoir contenant de l'alumine activée au travers d'éléments filtrants.

5. Groupe compresseur :

C'est un groupe compresseur standard présenté sous forme verticale.

Ses caractéristiques techniques sont les suivantes :

Pression maximum: 30 Bar

Rotation: 830tr/min

Puissance maximale requise : 7,5 kW [2]

6. Groupe moto compresseur :

Ses caractéristiques sont les suivantes :

Puissance maximale requise : 7,5 kW

Rotation: 830 tr/min

Chapitre 3. Les Groupes Electrogènes

Pression maximum: 30 Bar.

Notre groupe électrogène à la centrale thermo- électrique démarre à l'aide du groupe compresseur (air comprimé).

Comme solution alternative du démarrage du groupe, on propose un démarrage électrique.

1. Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

L'énergie nucléaire dépend d'un combustible fissile, l'uranium, dont le minerai est contenu dans le sous-sol de la Terre. Elle permet de produire de l'électricité, dans les centrales nucléaires, appelées centrales électronucléaires, grâce à la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'uranium.



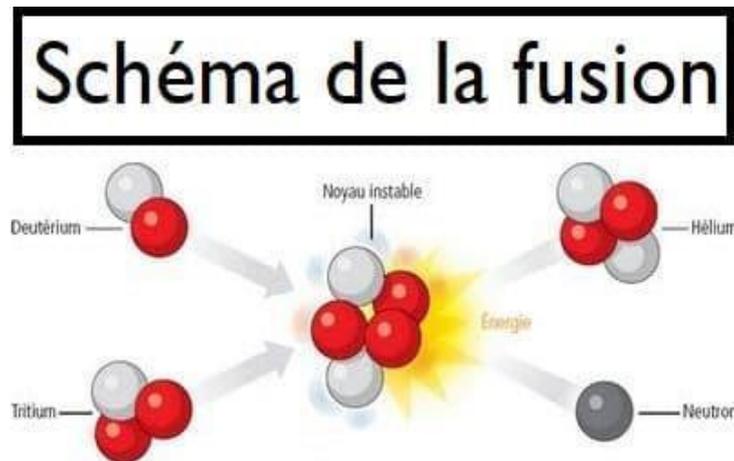
Une centrale nucléaire se compose de 4 parties principales :

- le **bâtiment contenant le réacteur** dans lequel a lieu la fission
- la **salle des machines** où est produite l'électricité
- les **départs de lignes électriques** qui évacuent et transportent l'électricité
- des **tours de refroidissement** uniquement en bord de rivière
 - La production d'électricité d'origine nucléaire est développée plus largement à partir de 1974, au lendemain du 1^{er} choc pétrolier, révélateur de la dépendance énergétique du pays vis-à-vis des hydrocarbures.
 - L'énergie nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre. Elle est utilisable en grandes quantités grâce aux puissances qu'elle génère et elle est très compétitive.

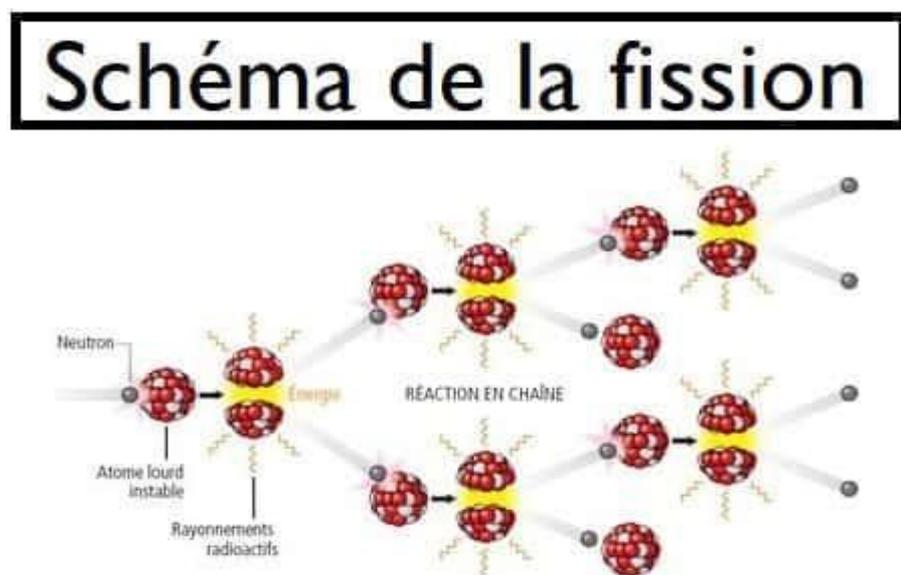
1. Quelle est la différence entre la fission et la fusion ?

La fission et **la fusion** sont deux types différents de réactions dans lesquelles de grandes quantités d'énergie sont libérées. Bien que l'énergie soit libérée pendant les réactions de fission et de fusion, la principale différence est que la fission est le processus de division d'un atome en deux particules ou quelques particules plus légères et la fusion est la fusion de deux atomes ou plus petites particules pour en former un plus grand. La fusion est un phénomène physique naturel, c'est-à-dire qu'il se produit dans la nature (pensons aux étoiles). En revanche, la fission

ne se produit normalement pas dans la nature. La fission se produit avec des éléments lourds comme l'uranium et la fusion permet d'obtenir des éléments plus légers. La fission et la fusion se produisent dans des conditions différentes. La fission nécessite une masse critique importante et un neutron lent pour amorcer le processus. La fusion se produit lorsque deux noyaux s'approchent très près l'un de l'autre. Ils ne s'assemblent que si la force active entre eux est capable de surmonter la force électrostatique qui les lie.



La fission se produit par réaction en chaîne, et aucune réaction en chaîne ne se produit en fusion. Dans la fission, la réaction en chaîne se produit en raison de l'interaction entre les neutrons et les isotopes fissiles c'est-à-dire que son noyau peut subir une fission nucléaire sous l'effet d'un bombardement de neutrons rapides ou lents. Entre-temps, la fusion n'a lieu que dans des conditions extrêmes de température et de pression.



Une autre différence entre les réactions de **fission** et les réactions de **fusion** est que l'énergie provenant de la **fission** peut être contrôlée, mais elle ne peut l'être en **fusion**. Bien que la **fusion** produise plus d'énergie et qu'elle soit moins dangereuse que les réactions de **fission**, les réacteurs de fusion doivent encore être mis au point, car il est plus coûteux de créer les conditions nécessaires à une réaction de **fusion**.

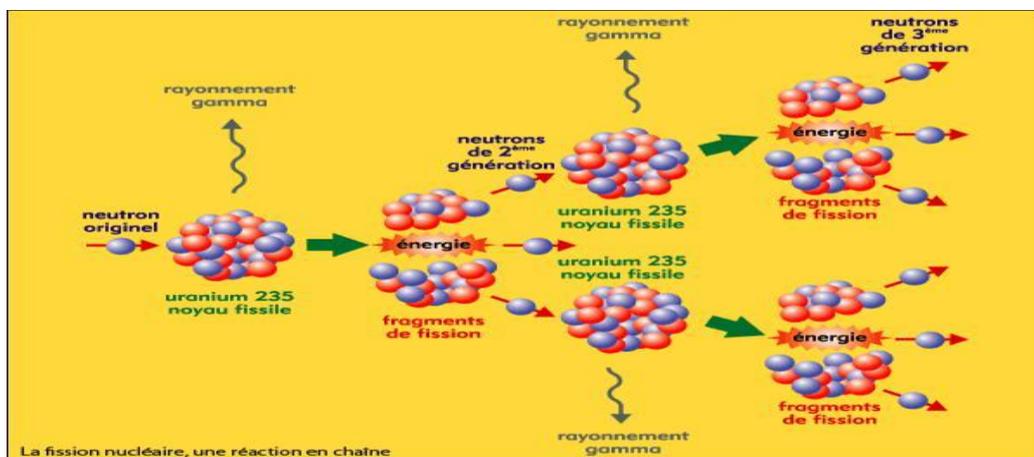
En comparant les déchets radioactifs produits par ces deux réactions, les déchets radioactifs issus de la **fusion** sont très faibles par rapport à ceux produits par une réaction de **fission**. La **fusion** produit également plus d'énergie et peut être trois à quatre fois plus importante que les réactions de **fission**.

3. La fission nucléaire

Une centrale nucléaire produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'uranium.

La réaction en chaîne de la fission nucléaire

- L'uranium est un élément constitué d'atomes lourds. Ces atomes possèdent **un noyau capable de se casser en deux noyaux plus petits sous l'impact d'un neutron**. Ce phénomène est appelé **fission nucléaire**.
- Le neutron n'ayant pas de charge électrique, il peut facilement s'approcher du noyau et pénétrer à l'intérieur sans être repoussé.
- La fission s'accompagne d'**un grand dégagement d'énergie** et en même temps, de la libération de deux ou trois neutrons. Les neutrons libérés peuvent à leur tour casser d'autres noyaux, dégager de l'énergie et libérer d'autres neutrons, et ainsi de suite. C'est ce que l'on appelle **une réaction en chaîne**.
- Dans les réacteurs des centrales, **des barres de contrôles** constituées de matériaux pouvant absorber les neutrons permettent **d'agir sur la réaction en chaîne**. Il est donc possible de faire varier la puissance du réacteur, le maintenir en marche ou l'arrêter.



4. Contrôle de la fission nucléaire

A. Comment contrôler la fission nucléaire ?

Une enceinte nucléaire fournit de l'électricité suivant une prévision de consommation. Il faut donc contrôler la puissance thermique et la régler trois fois plus fort que celle-ci (le rendement d'un réacteur nucléaire ne dépasse pas 33% en raison de la température relativement basse de la vapeur). Pour cela, nous allons introduire dans le cœur des barres de graphite sous forme de crayons plus ou moins enfoncés dans le réacteur. Ceux-ci contiennent des matières absorbant les neutrons comme le carbure de bore (le plus souvent utilisé).

C'est au centre du cœur qu'il y a le plus de flux de neutron, c'est donc en approchant ces crayons que l'on va apaiser la puissance ou en les éloignant que l'on va l'accroître. Les crayons sont donc sous forme de grappe pour éviter des inhomogénéités dans les flux de neutron. Ces grappes de crayons ont une utilité très importante mais n'agissent que par des déplacements limités.

B. Que se passe-t-il en cas d'urgence ?

En cas d'urgence, ou en cas d'anomalie, il faut arrêter la réaction en chaîne de la fission en cours pour éviter tout genre de problème. Il y a donc les barres de sécurité, elles sont aussi sous forme de grappe et, dans un mouvement rapide et brutal, elles sont introduites au cœur du réacteur. Cette manœuvre d'urgence est souvent sous le contrôle d'un automatisme, mais elle peut aussi être l'œuvre d'un opérateur. Ces barres sont retenues au-dessus de la cuve, dans l'axe du cœur rattachées par des électro-aimants. Il suffit donc de couper l'alimentation de ceux-ci pour que les barres chutent et pénètrent dans le cœur et stoppent tout le fonctionnement du réacteur.

5. Les différents types de réacteurs nucléaires

Une centrale nucléaire produit toujours de l'électricité à partir d'un combustible nucléaire mais il existe plusieurs types de réacteurs.

On peut les classer en 5 grandes catégories en fonction de la nature du combustible utilisé, de la substance qui transporte la chaleur appelée caloporteur et de la substance qui ralentit les neutrons appelée modérateur :

□ Réacteur à eau pressurisée (ou REP)

L'eau sous pression (donc à l'état liquide) est à la fois le caloporteur et le modérateur. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi.

Ce type de réacteur est le plus répandu dans le monde, représentant environ 55 % des réacteurs installés.

□ Réacteur à eau bouillante (ou REB)

L'eau est aussi le caloporteur, mais elle n'est plus pressurisée. À pression atmosphérique ambiante, elle devient bouillante. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi.

Ce type de réacteur représente 22 % des réacteurs installés dans le monde.

□ **Réacteur à eau lourde**

L'eau lourde est à la fois le caloporteur (mis sous pression) et le modérateur. C'est une eau constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène.

Le combustible utilisé est de l'uranium naturel.

□ **Réacteur à neutrons rapides (ou RNR)**

Ils n'utilisent pas de modérateur et cherchent à exploiter de façon plus complète les propriétés du combustible. Le fluide caloporteur est un métal liquide (tel le sodium) ou un gaz (par exemple l'hélium). Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi ou du plutonium. Ils peuvent générer de la matière fissile, d'où leur nom de surgénérateurs.

□ **Réacteur caloporteur gaz (RCG)**

L'hélium est le caloporteur. Porté à haute température, il peut alimenter directement la turbine sans échangeur intermédiaire. Il peut permettre la réalisation de centrales de petites tailles (de 100 à 300 MW) et peut également fonctionner avec des neutrons rapides.

6. Le processus de production d'électricité dans une centrale nucléaire à eau sous pression :

Dans les centrales nucléaires, relevant de la filière à eau sous pression, le combustible (pastilles d'uranium), situé dans la cuve du réacteur, chauffe l'eau du circuit primaire, qui lui-même chauffe l'eau du circuit secondaire et la transforme en vapeur, entraîne à son tour un alternateur qui va produire un courant électrique alternatif.

Trois circuits indépendants

□ **Le circuit primaire :** pour extraire la chaleur

L'uranium, légèrement « enrichi » en isotope 235, est conditionné sous forme de petites pastilles qui sont empilées dans des gaines métalliques étanches réunies en assemblages. Placés dans une cuve en acier remplie d'eau, ces assemblages forment le **cœur du réacteur**.

Ils sont le siège de la réaction en chaîne, qui les porte à haute température. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact et est maintenue sous pression, ce qui l'empêche de bouillir (réacteurs REP). Elle circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire.

□ **Le circuit secondaire :** pour produire la vapeur

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. Cet échange de chaleur s'effectue par l'intermédiaire du générateur de vapeur. Au contact des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire qui a été échauffée en traversant le cœur, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en

vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant l'alternateur qui produit l'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie par un troisième circuit d'eau froide pour être retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

□ **Le circuit de refroidissement** : pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit que l'on vient d'évoquer. Il est indépendant des deux autres. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine via un appareil formé de milliers de tubes (le condensateur) dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se retransforme en eau. L'eau du condenseur, qui n'a pas été au contact d'éléments radioactifs, est ensuite rejetée, légèrement chauffée, à la source d'où elle provient.

Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement, ou aéroréfrigérants. L'eau chaude provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur, une petite partie s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque ces panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires (mais certaines centrales thermiques possèdent le même système de refroidissement).

7. Les différents bâtiments d'une centrale nucléaire et leur rôle :

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité. Chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée. Une centrale nucléaire comprend fréquemment plusieurs réacteurs installés sur le même site, appelés parfois « tranches », identiques ou non.

a) La salle de commande :

Chaque réacteur nucléaire dispose d'une salle de commande. Les opérateurs centralisent l'ensemble des données liées au fonctionnement du réacteur et prennent les décisions concernant notamment la modulation de la puissance du réacteur (augmenter ou diminuer la puissance de celui-ci).

La salle de commande doit prendre en charge des dysfonctionnements occasionnels au fur et à mesure qu'ils se présentent. Loin d'être réduits à un dispositif passif de surveillance d'un système technique très automatisé, les membres de l'équipe sont au centre d'un flot d'activités très hétérogènes (discussions, lecture, écriture, coups de téléphones, etc.) visant à

gérer en temps réel les problèmes très variés qu'occasionne le fonctionnement quotidien et normal d'une installation complexe.



Salle de commande du réacteur EPR.

b) Le bâtiment réacteur

Il se compose généralement d'une enceinte (cette enceinte est double dans le cas du réacteur EPR) étanche qui contient la cuve principale renfermant le cœur du réacteur nucléaire, le pressuriseur (pour maintenir l'eau du circuit primaire à l'état liquide), les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la puissance de la centrale), les pompes primaires (pour faire circuler le fluide caloporteur), le circuit d'eau primaire, (pour assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur) et une partie du circuit d'eau secondaire.

c) Le bâtiment combustible

Accolé au bâtiment réacteur, il sert de stockage des assemblages du combustible nucléaire avant leur chargement dans le cœur (combustibles neufs) ou après leur déchargement du cœur (combustibles usés). Comme les combustibles usés dégagent encore de la chaleur une fois déchargés (du fait de leur très grande radioactivité), l'eau de la piscine sert au refroidissement de ces combustibles usés (un tiers ou un quart du combustible est remplacé tous les 12 à 18 mois). Le combustible est maintenu immergé dans ces piscines dont l'eau sert d'écran radiologique.

d) La salle des machines

Elle abrite la turbine à vapeur et l'alternateur, le condenseur, suivi de turbopompes alimentaires et les locaux périphériques d'exploitation, notamment la salle de commande, Véritable « cerveau » d'une tranche nucléaire. C'est dans la salle de commande que sont centralisées les principales données relatives au fonctionnement de la tranche. C'est de là que

partent les « ordres » transmis par les opérateurs aux différents composants et systèmes. Ce pilotage télécommandé fait largement appel à l'automatisation et à l'informatique. Il s'agit là d'aides indispensables pour les opérateurs. Mais ce sont eux qui restent les responsables à part entière du pilotage de la tranche et qui prennent les décisions prévues par les procédures.

e) Une station de pompage

Elle est nécessaire pour assurer les besoins en eau.

L'importance de l'eau

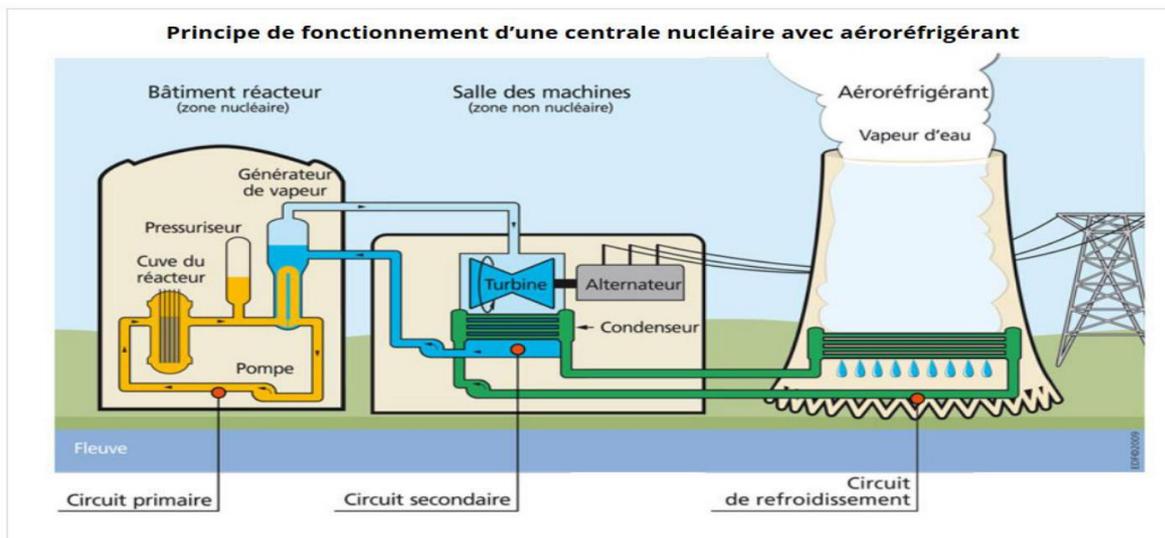
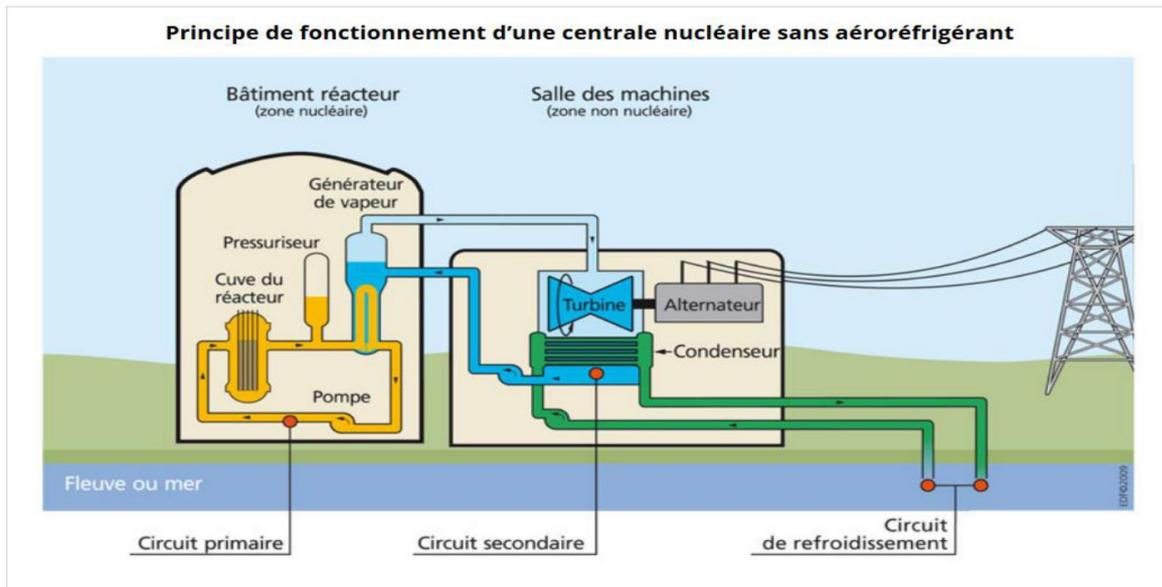
Le nucléaire utilise de l'eau pour des besoins de refroidissement indispensables au procédé de production d'électricité. Pour assurer le confinement de la radioactivité à l'intérieur du circuit primaire uniquement, les eaux contenues dans les autres circuits (le circuit secondaire et le circuit de refroidissement) ne se mélangent pas.

Les centrales implantées en bord de mer ou sur des fleuves à gros débit fonctionnent en circuit ouvert : l'eau, prélevée à raison de plusieurs dizaines de m³/s, est intégralement restituée au milieu aquatique, réchauffée de quelques degrés. Lorsque le fleuve n'a pas un débit suffisant ou s'il y a plusieurs centrales rapprochées le long d'un même cours d'eau, les installations sont équipées de tours aéroréfrigérantes (on parle de circuit fermé). La quantité d'eau prélevée est alors de l'ordre de quelques m³/seconde seulement.

f) Une ou plusieurs tours de refroidissement

C'est l'édifice le plus visible des centrales thermiques ou nucléaires. Ces aéroréfrigérants n'équipent que les centrales dont la source froide ne permet pas d'évacuer la chaleur nécessaire au fonctionnement et permettent ainsi de diminuer la pollution thermique de cette source froide. Certaines centrales nucléaires ne possèdent pas de réfrigérant atmosphérique. Elles sont refroidies uniquement par l'eau venant de la rivière ou de la mer.

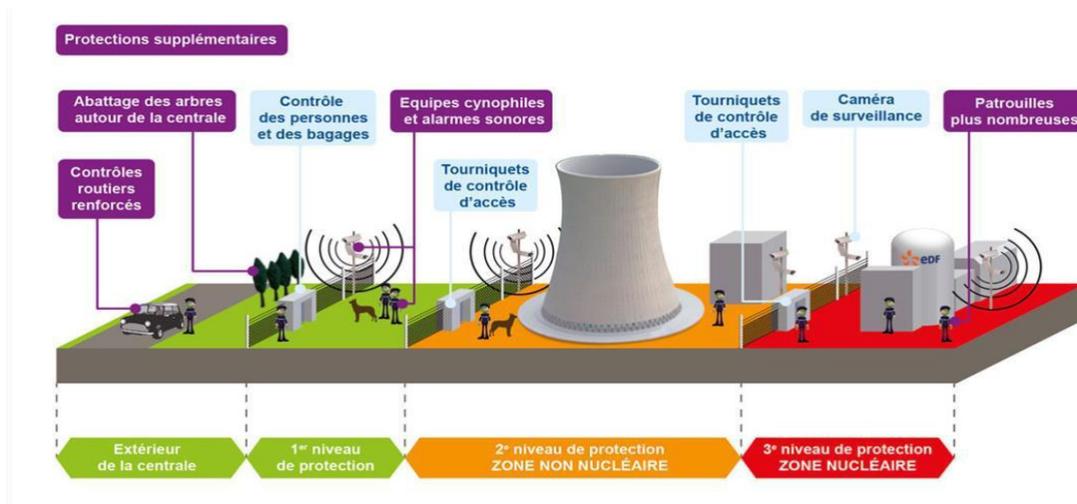
L'aéroréfrigérants est une tour creuse en son centre dans laquelle se crée, naturellement, un courant d'air entrant en partie basse et sortant en partie haute. Au passage, ce courant d'air prélève la chaleur contenue dans l'eau du circuit de refroidissement et la disperse dans l'atmosphère sous forme de nuage de vapeur d'eau. Pour remplacer ce volume de vapeur d'eau dispersé dans l'atmosphère, un prélèvement équivalent est réalisé depuis le fleuve. L'opération est reproduite en permanence. Seule l'eau du circuit primaire est radioactive, l'eau du circuit secondaire et l'eau du circuit de refroidissement ne sont jamais en contact avec le combustible nucléaire.



Vue des 4 aéroréfrigérants de la centrale de Cattenom, en Moselle. © Arnaud Bouissou/MEDDE/IRSN.

8. La sécurité autour des centrales nucléaires

Ce schéma illustre les mesures prises pour renforcer la sécurité autour des centrales nucléaires. Ces mesures visant à rendre les intrusions, même pacifistes, beaucoup plus difficiles, font l'objet d'exercices de crise réguliers.



Trois fonctions de sûreté :

Pour assurer la sûreté de fonctionnement d'un réacteur nucléaire, il est primordial de maintenir en permanence trois fonctions de sûreté :

- le **contrôle de la réaction en chaîne**. On parle également de maîtrise de la réactivité neutronique du cœur ;
- le **refroidissement du combustible nucléaire**. Lorsque le réacteur est en fonctionnement, il faut en continu évacuer la chaleur dégagée par le combustible nucléaire. Quand le réacteur est arrêté, il faut également évacuer la chaleur résiduelle qui subsiste après la fin de la réaction en chaîne ;
- le **confinement de la radioactivité**. Il s'agit d'empêcher la dispersion des substances radioactives dans l'environnement, et d'assurer la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants.

9. Le cycle de vie d'une centrale nucléaire

Du projet de construction au stade de déconstruction final, la vie d'une centrale obéit à un ensemble de procédures très réglementées.

La construction

Elle se déroule en **2 phases clés** :

1. L'avant-projet

Chapitre 4. Les Centrales Nucléaires

Les grandes idées de base du projet sont définies (architecture, position, dimension, organisation intérieure...). Parallèlement, une étude du site est menée pour déterminer l'emplacement exact et la conformité du site avec les critères requis et une procédure administrative est mise en place pour obtenir un décret d'autorisation de création.

2. Les études de réalisation

Elles vont jusqu'à la réalisation des plans d'exécution et se prolongent pendant toute la durée de construction de la centrale.

L'exploitation

Pendant cette période, la maintenance est organisée sur **3 niveaux** :

Quotidienne

Les différents équipements de la centrale sont surveillés de façon à effectuer les ajustements ou réparations nécessaires.

Programmée

Tous les 18 mois environ, chaque tranche est arrêtée pendant 5 à 6 semaines pour recharger en combustible une partie du cœur du réacteur.

Décennale

Tous les dix ans, une inspection détaillée et complète de la tranche est effectuée, en particulier des principaux composants (cuve, circuit primaire, générateurs de vapeur, enceinte de confinement...).

C'est à l'issue de ce bilan que l'Autorité de Sûreté Nucléaire donne l'autorisation de poursuivre l'exploitation du réacteur.

La déconstruction

1. La mise à l'arrêt définitif

La première phase comprend le déchargement du combustible, la vidange de tous les circuits puis la mise à l'arrêt définitif de la centrale avec le démontage des installations non nucléaires qui sont définitivement mises hors service. A la fin de cette phase, 99,9 % de la radioactivité présente sur le site est éliminée.

2. Le démantèlement hors bâtiment réacteur

Une fois le décret obtenu, les équipements et tous les bâtiments (à l'exception du bâtiment réacteur) sont démontés, et l'ensemble des déchets sont conditionnés et évacués vers les centres de stockage adaptés.

3. Le démantèlement du bâtiment réacteur

La dernière phase correspond au démantèlement de la cuve, à la démolition des bâtiments et à l'assainissement des sols.

Chapitre 4. Les Centrales Nucléaires

Une fois la déconstruction achevée, le site retrouve son niveau de radioactivité naturelle et sa surveillance n'est plus nécessaire. Il est alors rendu disponible pour de nouveaux usages industriels.



Définition : Qu'est-ce que l'énergie hydraulique ?

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'**énergie cinétique** du courant d'eau est transformée en **énergie mécanique** par une turbine, puis en **énergie électrique** par un alternateur.

L'hydroélectricité constitue **la première** source renouvelable et **la troisième** source générale de production électrique au monde (16,3 % en 2011) derrière le charbon (40,6%) et le gaz (22,2%).



Chaque année, environ 3 500 TWh d'électricité sont produits dans le monde à partir de l'énergie hydraulique.

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.

Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- Le **barrage** qui retient l'eau
- La **centrale** qui produit l'électricité
- Les **lignes électriques** qui évacuent et transportent l'énergie électrique

C'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée et c'est une énergie renouvelable très économique à long terme.

Le fonctionnement d'un barrage :

Une centrale hydraulique produit de l'électricité grâce à une chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes, qui mettent en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

1. La retenue de l'eau

Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. **De grandes quantités d'eau s'accumulent** et forment un lac de retenue.

2. La conduite forcée de l'eau

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que **l'eau s'engouffre** dans de longs tuyaux métalliques appelés **conduites forcées**. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas.

3. La production d'électricité

À la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une **turbine** qui fait à son tour fonctionner un **alternateur**. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, **l'alternateur produit un courant électrique alternatif**. **La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute et du débit de l'eau**. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

4. L'adaptation de la tension

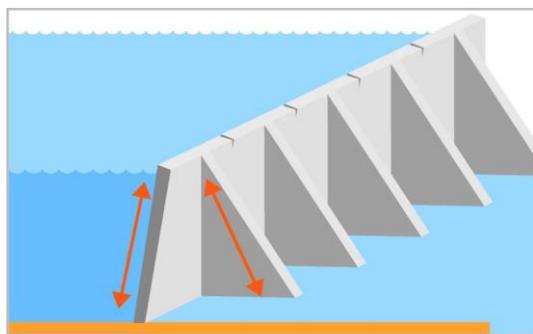
Un **transformateur** élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement **transporté dans les lignes à très haute et haute tension**. L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite.

Les différentes formes de barrages :

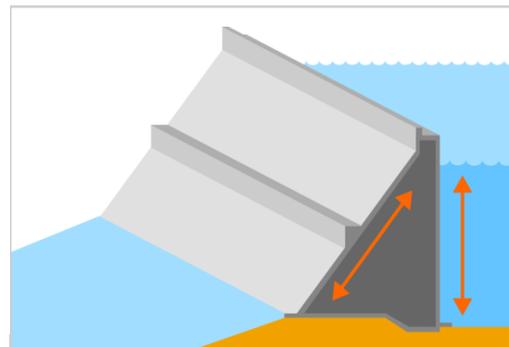
Il existe 3 principales formes de barrages :

□ Le barrage-poids

En béton ou en pierre, c'est le plus simple et le plus lourd. Il est vertical par rapport à la retenue et incliné par rapport à la vallée. Il s'appuie uniquement sur le sol. Ainsi, il oppose toute sa masse à la pression de l'eau.



Le barrage à contreforts © EDF



Le barrage-poids © EDF

□ Le barrage-voûte

En béton, il s'appuie en partie sur des parois rocheuses. Grâce à sa forme courbe, il reporte la pression de l'eau sur les rives. Il peut aussi être soutenu par des contreforts. Il est incliné par rapport à la retenue et vertical par rapport à la vallée. Il est souvent utilisé dans des vallées étroites.

□ Le barrage à contreforts

Ses contreforts triangulaires en béton lui permettent de reporter la pression de l'eau vers le sol. Il est très léger car son poids se réduit seulement à celui des contreforts.

Catégories de centrales :

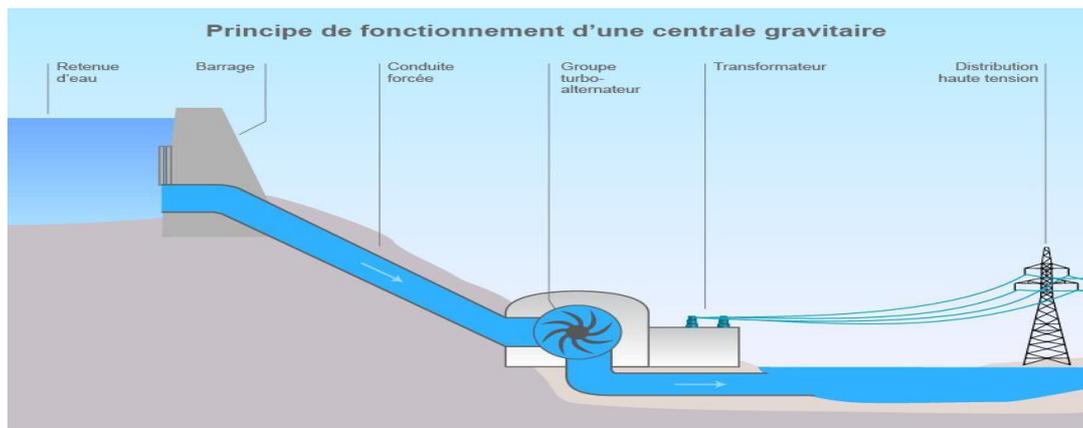
Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

Une centrale hydroélectrique se compose d'une retenue d'eau (prise « au fil de l'eau » ou barrage) ainsi que d'une installation de production.

I. Les centrales gravitaires :

Les centrales gravitaires mettent à profit l'écoulement de l'eau et un dénivelé. Elles peuvent être classées en fonction du débit turbiné et de leur hauteur de chute. Il existe trois types de centrales gravitaires (ici énumérées par ordre d'importance dans le mix hydraulique):

- **Les centrales au fil de l'eau ou de basse chute :** Elles sont implantées **sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières**. Elles sont caractérisées par **un débit très fort et un dénivelé faible** avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel. Les centrales au fil de l'eau utilisent des turbines de type **Kaplan**.
- **Les centrales d'écluse ou de moyenne chute :** Elles sont surtout installées **en moyenne montagne** et dans les régions de bas relief. Elles sont caractérisées par **un débit moyen et un dénivelé assez fort** avec une chute comprise entre 30 et 300 m. Les centrales d'écluse utilisent des turbines de type **Francis**.
- **Les centrales de lac ou de haute chute :** Elles sont **surtout présentes dans les sites de haute montagne**. Elles sont caractérisées par **un débit faible et un dénivelé très fort** avec une chute supérieure à 300 m. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau pour former un lac de retenue. Ce lac est alimenté par l'eau des torrents, la fonte des neiges et des glaciers. Les centrales de lac utilisent des turbines de type **Pelton**.



Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire (2011)

II. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) :

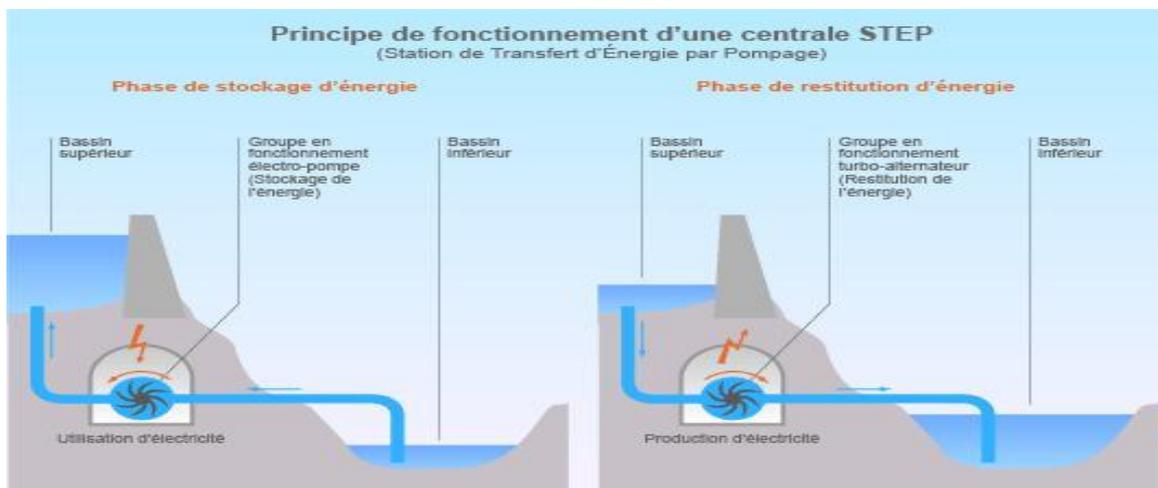
Les stations de transfert d'énergie par pompage (ou STEP) possèdent deux bassins, un bassin supérieur (par exemple, un lac d'altitude) et un bassin inférieur (par exemple une retenue artificielle) entre lesquels est placé un dispositif réversible pouvant aussi bien fonctionner comme pompe ou turbine pour la partie hydraulique et comme moteur ou alternateur pour la partie électrique.

L'eau du bassin supérieur est turbinée en période de forte demande pour produire de l'électricité. Puis, cette eau est pompée depuis le bassin inférieur vers le bassin supérieur dans

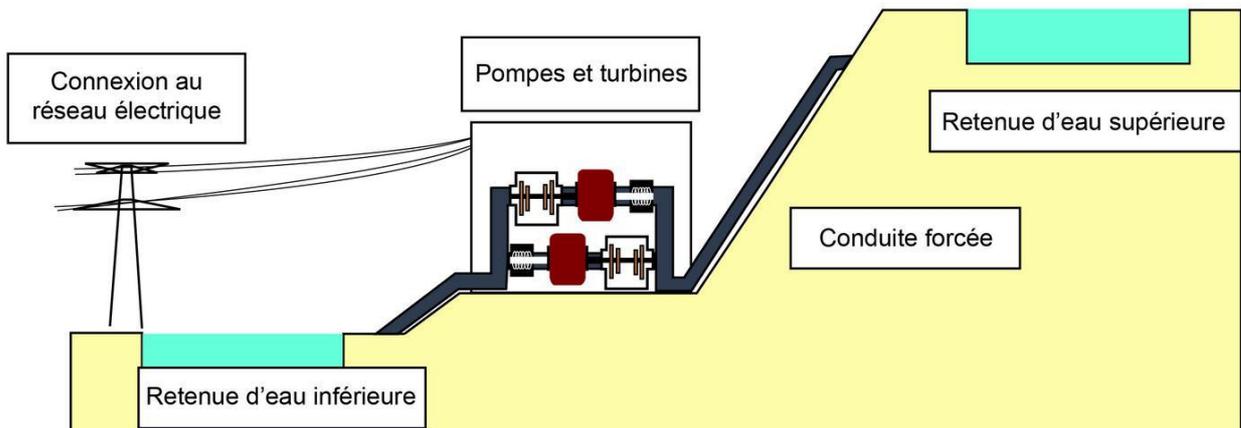
Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

les périodes où l'énergie est bon marché, et ainsi de suite. Les STEP ne sont pas considérées comme productrices d'énergie de source renouvelable puisqu'elles consomment de l'électricité pour remonter l'eau turbinée.

Ce sont des installations de stockage d'énergie. Elles interviennent fréquemment pour des interventions de courte durée à la demande du réseau et en dernier recours (après les autres centrales hydrauliques) pour les interventions plus longues, notamment en raison du coût de l'eau à remonter. Le rendement entre l'énergie produite et l'énergie consommée est de l'ordre de 70% à 80%. L'opération se révèle rentable lorsque la différence de prix de l'électricité entre les périodes creuses (achat d'électricité à bas prix) et les périodes de pointe (vente d'électricité à prix élevé) est importante.



Principe de fonctionnement d'une station de transfert d'énergie par pompage (©2011)



Fonctionnement technique :

Les centrales hydrauliques sont constituées de 2 principales unités :

- une retenue ou une prise d'eau (dans le cas des centrales au fil de l'eau) qui permet de créer une chute d'eau, avec généralement un réservoir de stockage afin que la centrale continue de fonctionner, même en période de basses eaux. Un canal de dérivation creusé

Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

peut permettre de dériver latéralement l'excédent d'eau arrivant vers un étang de barrage. Un évacuateur de crues permet de faire passer les crues de la rivière sans danger pour les ouvrages ;

- la centrale, appelée aussi usine, qui permet d'utiliser la chute d'eau afin d'actionner les turbines puis d'entraîner un alternateur.

Les barrages :

- les plus fréquents, de loin, sont les barrages en remblai de terre ou d'enrochements obtenus en carrière par abattage à l'explosif. L'étanchéité est centrale (en argile ou en béton bitumineux) ou sur la surface amont (en béton de ciment ou en béton bitumineux). Ce type de barrage s'adapte à des géologies très variées ;
- les barrages poids construits d'abord en maçonnerie, puis en béton puis plus récemment en béton compacté au rouleau (BCR) qui permet d'importantes économies de temps et d'argent. Le rocher de fondation doit être de bonne qualité ;
- les barrages voutes en béton adaptés aux vallées relativement étroites et dont les rives sont constituées de rocher de bonne qualité. La subtilité de leurs formes permet de diminuer la quantité de béton et de réaliser des barrages économiques ;
- les barrages à voutes multiples et à contreforts ne sont plus construits. Les barrages poids en BCR les remplacent.

Les turbines :

Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs. Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau :

- pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines à bulbe peuvent être utilisées ;
- pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, la turbine Kaplan est privilégiée : ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement ;
- la turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre ;
- la turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit. Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités.

Unités de mesure et chiffres clés :

Mesure de la puissance hydroélectrique :

La puissance d'une centrale hydraulique peut se calculer par la formule suivante :

$$P = Q \cdot \rho \cdot H \cdot g \cdot r$$

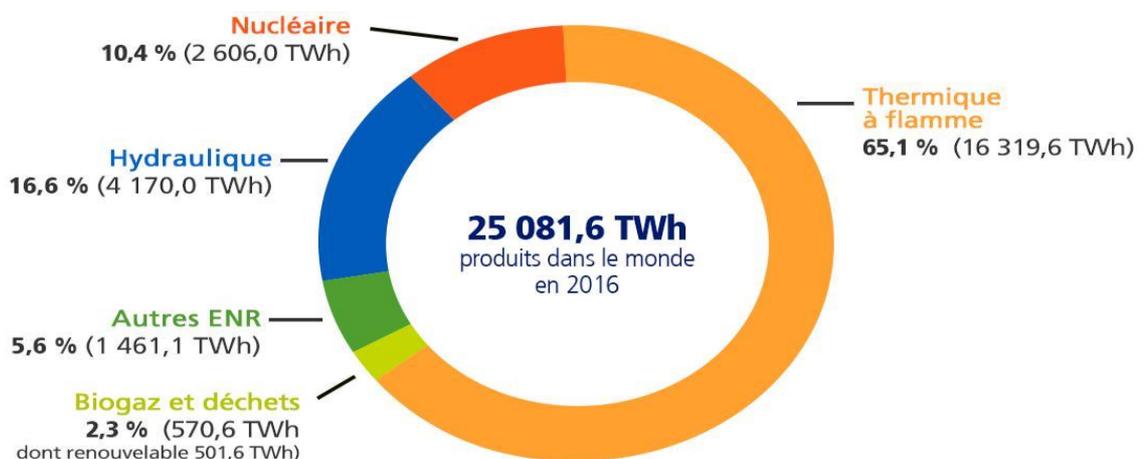
Avec :

- P : puissance (exprimée en W) ;
- Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde ;
- ρ : masse volumique de l'eau, soit 1 000 kg/m³ ;
- H : hauteur de chute en mètres ;
- g : constante de gravité, soit près de 9,8 (m/s²) ;
- r : rendement de la centrale (compris entre 0,6 et 0,9)

Chiffres clés :

Dans le monde :

- chaque année, environ 3 500 TWh d'électricité sont produits dans le monde à partir de l'énergie hydraulique ;
- l'hydroélectricité représente 20% des capacités électriques installées avec un parc global de 1 040 GW (selon Enerdata, 2011) ;
- une dizaine de pays, dont quatre en Europe, produisent plus de la moitié de leur électricité grâce à l'hydraulique. La Norvège vient en tête avec 98%, suivie par le Brésil avec 86%, la Colombie, l'Islande, le Venezuela, le Canada, l'Autriche, la Nouvelle Zélande et la Suisse.



La production mondiale d'électricité en 2016

Source : International Energy Agency (IEA)

© EDF

Les avantages de l'énergie hydraulique :

1. **Une énergie entièrement maîtrisée** : Grâce à des années d'expérience acquises à transformer la puissance de l'eau en énergie, l'être humain a parfaitement appris à maîtriser ce sous-jacent et les différentes façons de le transformer.
Cette énergie est propre, car nous savons aujourd'hui la produire, au sein de centrales hydroélectriques sans rejeter quoi que ce soit de nocif dans la nature. À ce jour, il s'agit donc de l'énergie la plus propre connue pour produire de l'électricité à grande ampleur.
2. **Des rendements intéressants** : Cette énergie est basée sur des constructions importantes capables de produire des quantités élevées d'énergie. Les rendements d'une centrale sont donc importants d'autant que ces centrales sont souvent placées dans des endroits intéressants au niveau géographique avec des reliefs de terrain permettant des chutes d'eau importantes.
3. **Une flexibilité de la production** : Le système des barrages permet de pouvoir facilement régler l'intensité du débit d'eau et la production d'énergie finale. L'énergie hydraulique est donc parfaitement flexible et il est relativement aisé pour les centrales de pouvoir s'adapter aux besoins du réseau en décidant d'ouvrir plus ou moins le barrage mis en place.
4. **Une sécurité absolue** : Par le fait qu'elle n'utilise aucun carburant de type fossile ou nucléaire, l'énergie hydraulique est une des énergies les plus sûres en termes de production. Aucun risque d'explosion n'existe au sein de ces centrales et le coût de la sécurité de ces centrales est nettement plus faible que celui d'une centrale nucléaire par exemple.

Les inconvénients de l'énergie hydraulique :

1. **Des investissements lourds** : L'investissement dans une centrale hydraulique est lourd en termes de montant. En effet, la construction d'un barrage d'envergure sûr et durable nécessite des coûts de génie civil importants.
2. **Des impacts environnementaux à la construction** : La construction d'une centrale destinée à produire de l'énergie hydraulique peut avoir un effet indésirable pour l'environnement dans lequel elle est implantée. En effet, construire un barrage en plein milieu d'un cours d'eau nécessite une intervention humaine importante qui trouble l'écosystème naturel. Par ailleurs, la centrale hydraulique nécessite de construire des réseaux de lignes électriques à proximité de la production. Ces constructions peuvent avoir un impact au niveau du paysage et du coût global de l'installation, intégrant les nouvelles routes à construire et les poteaux de soutien des fils électriques.

Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

3. **Le risque de sécheresse** : Le sous-jacent de l'**énergie hydraulique** étant l'eau, il est clair qu'une éventuelle sécheresse peut avoir des impacts fortement négatifs sur l'ensemble de la production.

Ainsi, même si cette énergie est particulièrement maîtrisable, il n'en demeure pas moins que le risque de sécheresse est peu planifiable et que ce dernier peut engendrer un arrêt total de la production d'énergie et perturber de manière importante le réseau énergétique du pays.

4. **La nécessité d'avoir un terrain propice** : L'**énergie hydraulique** se base sur la nécessité d'avoir du relief pour que l'intensité de l'eau soit importante. De fait, cette production d'énergie nécessite de se situer sur des reliefs de type montagneux où les cours d'eau peuvent avoir des chutes importantes et où les courants maritimes sont particulièrement forts. La plupart des endroits exploitables par l'**énergie hydraulique** ont déjà été équipés. La possibilité d'augmenter de manière forte la part de l'**énergie hydraulique** dans le mix énergétique français et mondial est donc peu probable dans les années à venir, limitant ainsi le potentiel de cette énergie propre.

Chapitre 5. Les Centrales Hydrauliques

Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ?

- Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.
- Les énergies renouvelables proviennent de **2 grandes sources naturelles** : **le Soleil** (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et **la Terre** (qui dégage de la chaleur).
- Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », **leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes** mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.

Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.



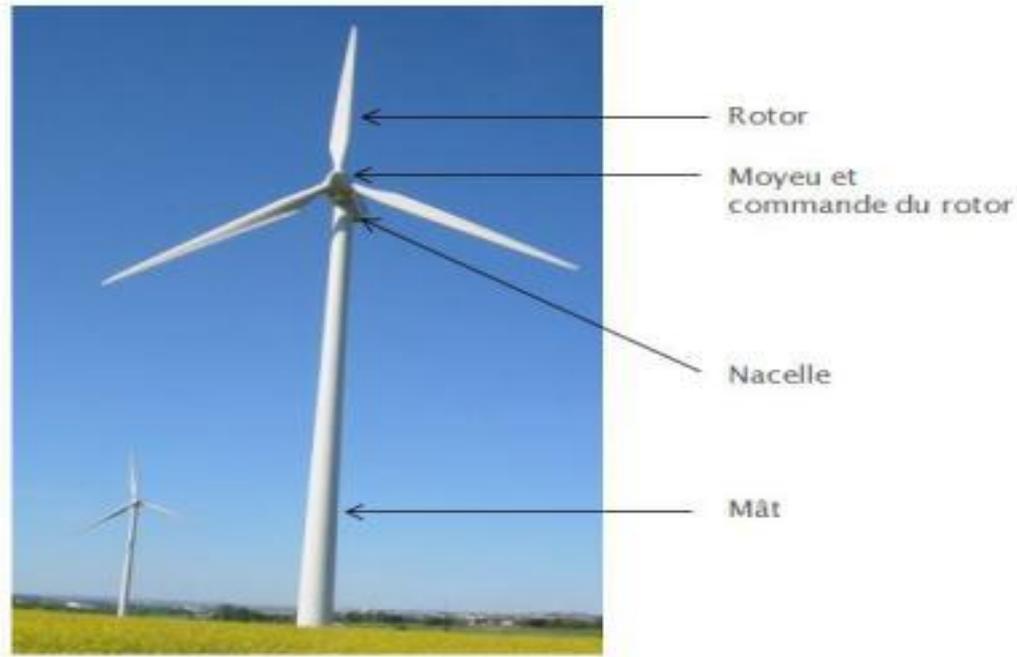
Une éolienne est composée de 4 parties :

- Le **mât**
- L'**hélice**
- La **nacelle** qui contient l'alternateur producteur d'électricité
- Les **lignes électriques** qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau)

Descendante du moulin à vent du Moyen Âge, la première éolienne a été mise en service en France à Dunkerque en 1990. C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite.

Description d'une éolienne :

Une éolienne est composée de quatre éléments principaux : le mât, la nacelle, le rotor et le moyeu.

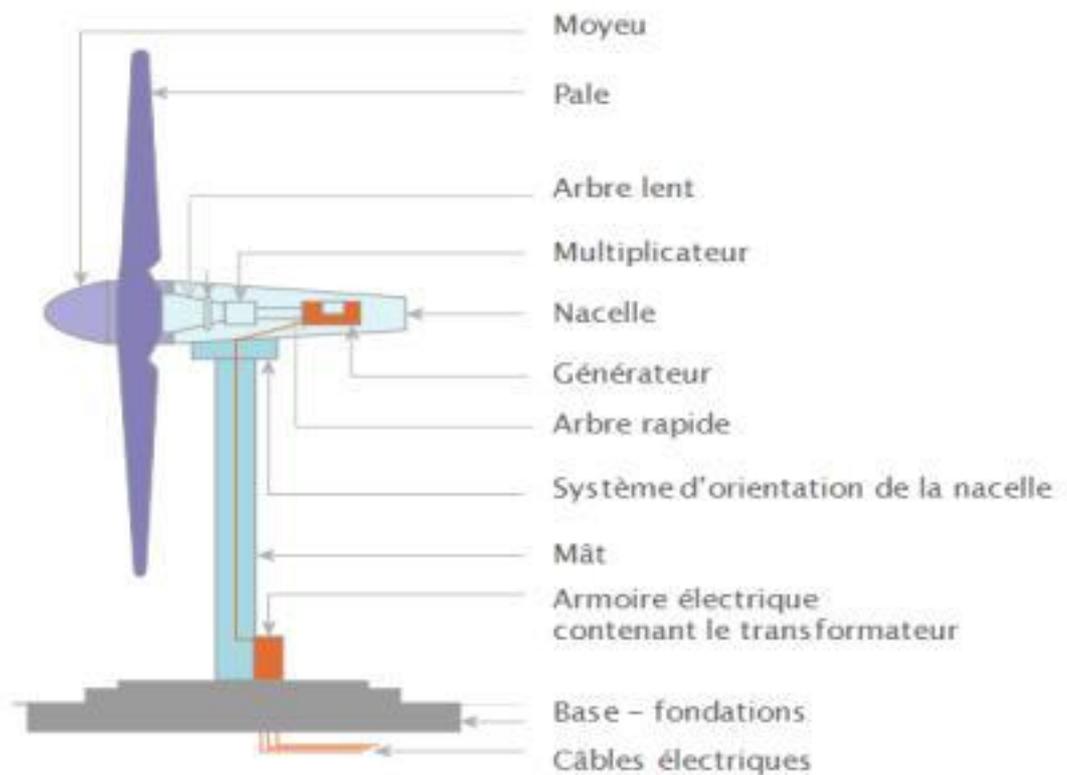


- **le rotor** : constitue la partie rotative de l'éolienne, il est placé en hauteur afin de capter des vents nécessaires au bon fonctionnement de l'appareil. Généralement, le rotor est constitué de deux ou trois pales, qui tournent sous l'effet du vent. Celles-ci peuvent en moyenne mesurer 25 à 60 mètres de long et tournent à une vitesse allant de 5 à 25 tours par minute. Elles sont reliées par **le moyeu**.
- **le mât** : tour cylindrique qui supporte la nacelle et le rotor en hauteur. Il peut mesurer entre 50 et 130 mètres, et il contient les câbles électriques de raccordement au réseau électrique.
- **la nacelle** : structure située en haut du mât, abritant la plus grande partie de l'installation électrique (les arbres, le multiplicateur, le générateur).

Fonctionnement d'une éolienne :

Cette partie décrit comment une éolienne récupère l'énergie du vent pour la transformer en énergie mécanique puis électrique.

LES DIFFÉRENTS COMPOSANTS D'UNE ÉOLIENNE :



Pour récupérer le maximum de puissance et être au plus proche de la puissance nominale (c'est -à-dire optimale), les éoliennes se positionnent automatiquement en fonction du vent :

- L'éolienne s'oriente automatiquement en fonction du vent pour récupérer le maximum de puissance. En général les grosses éoliennes se tournent de façon à avoir le vent dans le dos ; les petites machines se positionnent face au vent,
- L'orientation des pales permet de régler l'angle des pales par rapport au vent et donc la surface en contact avec le vent.

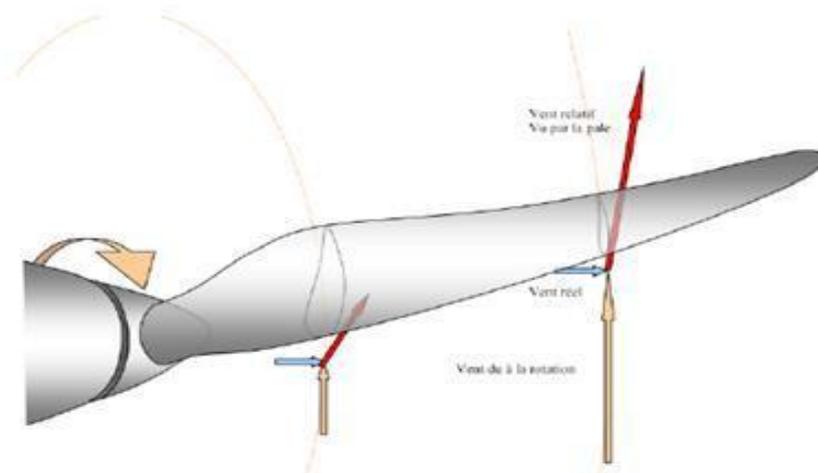
Les étapes du fonctionnement de l'éolienne:

La rotation des pales d'une éolienne est due à l'action du vent. Lorsqu'elles sont en rotation, les pales subissent plusieurs forces : la force du vent et la force de la rotation.

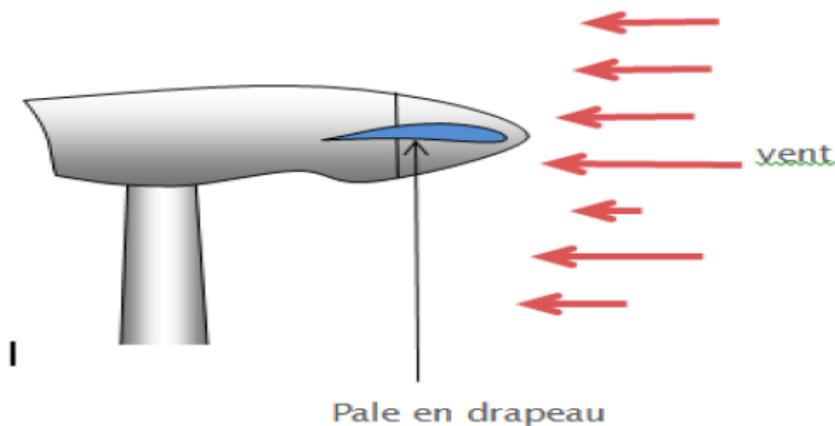
Les pales des éoliennes tournent à 42 tours par minute ce qui correspond à 70 m/s en bout de pale.

La vitesse des pales est un réel point faible: elle ne peut être trop élevée car le matériel ne pourrait pas résister, en particulier le générateur. La vitesse maximale de vent prise en compte pour les calculs de résistance des éoliennes est en général 60m/s ; cela correspond à la vitesse maximale de vent observée pour de nombreuses régions de la planète. Au-delà de cette vitesse, les pâles sont arrêtées pour éviter les dégâts. Si par contre le vent est trop faible, il n'y a aucun

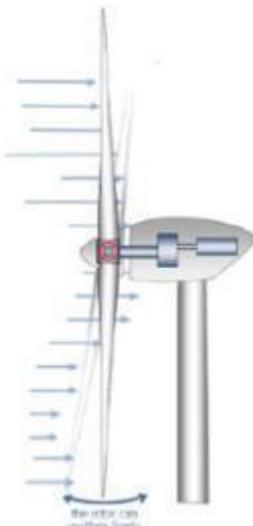
intérêt d'utiliser la machine : l'usure de l'éolienne serait alors plus importante que l'énergie récupérée.



Pour arrêter une éolienne, il faut positionner les pales en drapeau de façon à ce que leurs surfaces ne soient pas en contact avec le vent.

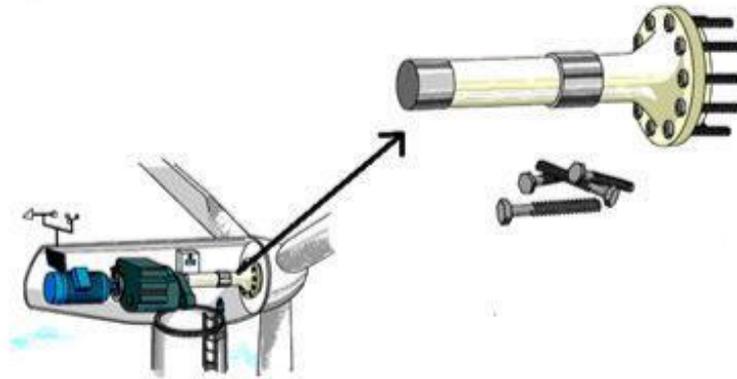


Le moyeu est la pièce supportant les pâles.



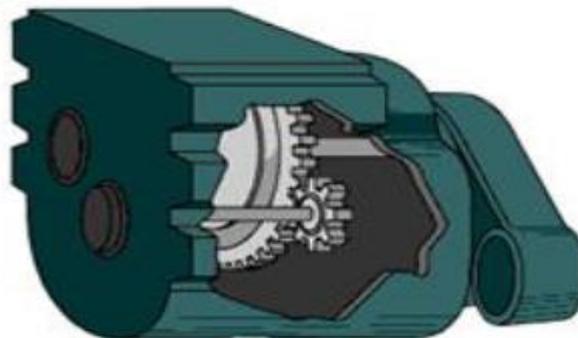
Les deux pales et le moyeu peuvent osciller librement sur l'axe porté par l'arbre lent. Quand un déséquilibre apparaît, l'ensemble bascule. L'arbre lent n'est ainsi pas soumis à la fatigue de flexion due aux différences d'effort ; la fatigue des pales est également réduite.

Le rotor, la pièce supportant les pales et le moyeu, est monté sur un disque extrêmement solide placé au bout de l'arbre principal de l'éolienne.



L'arbre lent relie le moyeu du rotor au multiplicateur. Cette pièce transmet le mouvement de rotation au multiplicateur. Il tourne lentement (30 à 40 tours/minute) et transmet une très grande force de rotation au multiplicateur.

Le multiplicateur est une boîte de vitesse permettant d'élever la vitesse de rotation de l'arbre lent à un niveau suffisant pour permettre de produire de l'électricité avec la génératrice. Il est constitué d'un ensemble d'engrenages. La vitesse de sortie se situe entre 1000 et 1500 tours/minute.



Le multiplicateur.

Le multiplicateur.

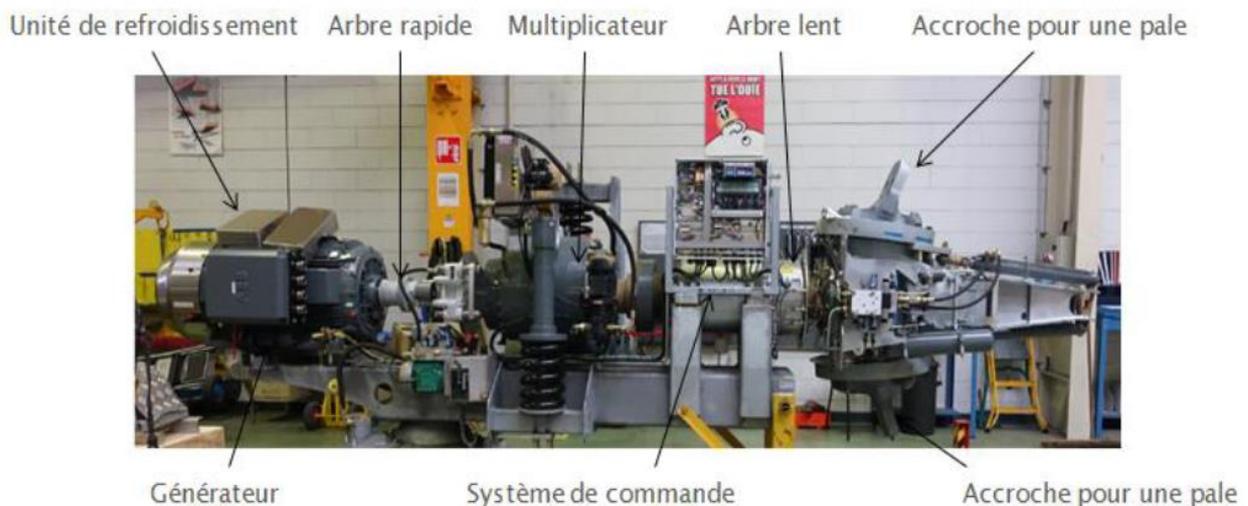
L'arbre rapide relie le multiplicateur à la génératrice. Il transmet moins de force que l'arbre lent, c'est pour cela qu'il est plus mince, par contre il est très rapide (1500 tours/minute). Un frein mécanique est placé sur l'arbre rapide pour verrouiller les pales de l'éolienne lorsqu'il y a

une maintenance à réaliser (sécurité supplémentaire par rapport aux pales qui sont alors mises en drapeau).

L'alternateur est un dispositif qui permet la conversion de l'énergie mécanique en un courant alternatif et permet de fournir, à ses bornes, une tension alternative. Il est composé de deux parties: une bobine fixe et une source de champ magnétique rotative (aimant ou un électroaimant).

Selon un phénomène appelé induction, un aimant en mouvement fait naître une tension aux bornes d'une bobine située à proximité. Le signe de la tension produite dépend de deux facteurs: le pôle magnétique de l'aimant présenté face à la bobine ainsi que le mouvement d'approche ou d'éloignement de cet aimant. Lors de la rotation d'un aimant dans un alternateur on a successivement des mouvements d'approche puis d'éloignement du pôle sud magnétique puis du pôle nord.

L'alternateur fournit donc une tension variable qui est alternativement positive puis négative. A chaque alternance du signe de la tension, les bornes positives et négatives, portées par la bobine, permutent et produisent un courant électrique dont le sens s'inverse.



Châssis d'une éolienne en cours de montage

Le système de commande est relié à l'ordinateur qui se trouve au bas du mât. Il permet de régler automatiquement certaines parties de l'éolienne comme l'inclinaison des pales ou la vitesse du rotor pour avoir un rendement maximal, limiter le bruit et la fatigue du mât. Les paramètres de l'éolienne sont rectifiés automatiquement suite aux valeurs fournis par différents capteurs ou appareils de mesure comme l'anémomètre et la girouette placée au-dessus de la nacelle et qui donnent la vitesse et la direction du vent.

Chapitre 6. Energies Eoliennes

Les unités de refroidissement permettent de réguler la température de la génératrice.

L'électricité produite par le générateur est ensuite descendue par des câbles dans le mât. Le courant ensuite par un transformateur qui le transforme en courant alternatif.

Au pied du mât, ou à l'intérieur suivant le type d'éolienne, se trouve un ordinateur qui contrôle les mesures faites par l'anémomètre et la girouette, et les valeurs de différents capteurs de l'éolienne. Grâce à ces différentes mesures, l'ordinateur modifie les paramètres de l'éolienne (inclinaison des pales, orientation du rotor,...).

L'ordinateur compte aussi le nombre de tours faits par l'éolienne. Si l'éolienne s'oriente toujours dans le même sens, ses câbles électriques peuvent se tordre. L'ordinateur fait alors tourner l'éolienne dans le sens contraire. En général le nombre de tours maximal dans le même sens est de trois.

Cet ordinateur envoie également toutes les informations au réseau afin que les équipes techniques contrôlent le bon fonctionnement de l'éolienne.

Le mât repose soit sur d'énormes fondations en béton armé (bloc de minimum 100 tonnes enterrés de 5 à 6 mètres de profondeur), soit pour les éoliennes à deux pales avec un système beaucoup plus léger.

L'énergie éolienne : une énergie utilisée depuis longtemps

Avec l'eau et le bois, le vent a été **une des premières ressources naturelles à avoir été utilisée** pour faciliter la vie de l'homme. En maîtrisant la force du vent, des hommes ont pu moudre les grains avec des moulins à vent. En naviguant sur des bateaux à voile, des explorateurs ont découvert de nouvelles terres.

Aujourd'hui, **l'énergie éolienne permet de produire de l'électricité.**



Où placer une éolienne ?

Les éoliennes peuvent être placées sur terre (**éolien terrestre**). Ce sont les champs d'éoliennes ou parc éolien. Mais elles peuvent aussi être placées en mer. On parle alors d'**éolien maritime**, ou offshore. Avant de décider de l'installation d'un parc éolien, plusieurs études sont menées. La première étape consiste à s'assurer que le site d'implantation envisagé convient à un tel projet. Il doit en particulier :

- être **suffisamment venté**. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences, tout au long de l'année. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles s'arrêtent pour des raisons de sécurité. **La production électrique varie selon la vitesse du vent**. C'est avec des vents de 45 à 90 km/h que l'éolienne produit sa puissance maximale ;
- ne pas être soumis à certaines contraintes (aéronautiques, radars, etc.) ;
- prendre en compte le patrimoine naturel**, en particulier l'avifaune (faune animale des oiseaux) et la faune marine pour l'éolien maritime et éviter les zones protégées (telles que les réserves) ;
- ne pas prendre place dans des **secteurs architecturaux ou paysagers sensibles** (sites inscrits et classés, paysages remarquables, etc.).

Il n'est pas interdit d'installer une éolienne hors de ces zones, mais ces éoliennes ne seront pas forcément reliées au réseau électrique. Elles serviront par exemple à fournir de l'électricité à une exploitation agricole.

Le saviez-vous ?

Les éoliennes tournent plus de 80% du temps, à des vitesses variables en fonction de la puissance du vent. Ainsi, un parc éolien de 4 à 6 éoliennes couvre les besoins en électricité de près de 12 000 personnes.

Les différents types d'éolienne :

LES EOLIENNES ONSHORE :

Il s'agit des éoliennes terrestres. Elles sont regroupées en deux catégories : les éoliennes « classiques » et les éoliennes anticycloniques, utilisées dans les régions isolées.

Les éoliennes « classiques »

Il existe différentes éoliennes « classiques » classées selon leur capacité en MW.



Les éoliennes anticycloniques

Elles sont utilisées dans les régions isolées ou dans les régions « à cyclone ».



LES EOLIENNES OFFSHORE

Les éoliennes offshore sont installées en mer. Elles permettent elles aussi, comme les éoliennes onshore, de convertir l'énergie cinétique du vent en de l'énergie électrique.

La principale différence entre une éolienne onshore et une éolienne offshore tient à la nature des fondations : elles doivent être fixées ou ancrées au fond de la mer et être suffisamment solides pour résister aux conditions marines (force du courant). C'est pour cette raison que les parcs éoliens marins ne sont généralement pas implantés dans des zones où la profondeur dépasse 40 mètres.



Pour résoudre ce problème, des spécialistes essayent de mettre au point des éoliennes flottantes. Mais d'autres problèmes se posent : cette innovation nécessite une transmission par câbles sous-marins et le mouvement de l'eau peut perturber le mouvement des pâles.



□ **Les avantages de l'éolienne offshore :**

Les vents marins offrent de meilleurs résultats que ceux qu'on a avec les vents terrestres : il y a moins d'obstacles en mer que sur terre, alors les vents sont plus forts et plus réguliers. A une puissance égale, l'éolienne offshore peut produire jusqu'à deux fois plus d'énergie que l'éolienne onshore. La mer offre beaucoup plus d'espaces libres.

□ **Les inconvénients de l'éolienne offshore:**

L'éolienne offshore coûte beaucoup plus cher qu'une éolienne terrestre : un prix d'environ 30 à 50% supérieur.

Elle est contrainte à de nombreuses forces : la force du vent sur les pales et la structure mais aussi la force du courant marin.

L'installation d'un parc maritime est plus difficile que les parcs terrestres.

Le raccordement au réseau électrique nécessite la mise en place de câbles sous-marins jusqu'à la côte.

Le petit éolien :

Le petit éolien ou éolien individuel désigne des machines de petites et moyennes puissances (de 0,1 à 20 kW), montées sur des mâts de 10 à 30 mètres. En moyenne, la puissance est de 5 kW et la hauteur des mâts, de 10 à 12 m. Une petite éolienne est équipée d'un rotor à deux ou trois pales, de 2 à 10 m de diamètre, qui tournent entre 10 et 25 tours par minute environ. Elle fonctionne sur le même principe de base qu'un grand aérogénérateur. Un onduleur permet d'obtenir un courant aux qualités constantes malgré les variations du vent.

La durée de vie d'une éolienne est de 20 à 30 ans.

On peut trouver deux sortes d'éoliennes :

- Les éoliennes à **axe vertical** (de type Darrieus).
- Les éoliennes à **axe horizontal**.

Le petit éolien est parfois utilisé pour des sites isolés et en milieu rural, pour le pompage de l'eau par exemple. Les éoliennes les plus courantes fonctionnent mal dans les zones urbaines où les turbulences sont importantes. Une éolienne d'une puissance de 5 kW, qui tourne 2 000 heures par an à sa puissance nominale, produira l'équivalent de la consommation d'un ménage.



Les éoliennes à **axe vertical** (de type Darrieus)



Les éoliennes à **axe horizontal**

La puissance d'une éolienne :

L'énergie produite par une éolienne dépend de sa vitesse, de la régularité de rotation et de la surface de ses pales.

La vitesse de rotation de l'hélice est de 12 à 15 tours/min, ce qui n'est pas suffisant à un alternateur pour fonctionner correctement. Un multiplicateur de vitesse est donc placé juste avant l'alternateur pour augmenter la vitesse de rotation à environ 1 500 tours/ min. Le vent est par définition variable. Aussi, pour maintenir une vitesse de rotation constante, il faut que les pales captent le mieux possible le vent.

Pour cela, un calculateur est intégré dans la nacelle pour :

- orienter l'hélice perpendiculairement à la direction du vent ;
- modifier l'angle d'orientation des pales par rapport au vent.

Plus les pales ont de surface, plus l'énergie produite est importante. Les éoliennes sont donc de plus en plus grandes. En contrepartie, cela alourdit le poids de l'hélice qui du coup, tourne moins vite.

Les technologies actuelles, issues de l'aérospatiale, ont permis des gains de poids importants pour résoudre ce problème.

PUISSANCE ÉLECTRIQUE PRODUITE :

$$P_{\text{électrique}} = \underbrace{\eta_{\text{turbine}} \cdot \eta_{\text{boîte}} \cdot \eta_{\text{alternateur}}}_{\text{(rendements)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \rho}_{\text{(masse volumique)}} \cdot \underbrace{A}_{\text{(surface balayée)}} \cdot \underbrace{v^3}_{\text{(vitesse)}}$$

Dimensions éolienne vs turbine hydraulique :



(P=750 kW; Tour=100 m (20 étages);

Rotor: 70 m diamètre)



(P=750 MW; Rotor: 6 m diamètre)

Dimensions des éoliennes :

Puissance électrique (kW)	Diamètre rotor (m)	Hauteur tour (m)
750	~ 47	~ 56
1500	~ 66	~ 79
3000	~ 93	~ 112
5000	~ 120	~ 144

Taille des éoliennes :

On distingue les éoliennes en fonction de leur puissance :

- le « micro-éolien » : machines < 1 kW ;
- le « petit éolien » : machines entre 1 kW et 36 kW ;
- le « moyen éolien » : machines entre 36 kW et 250 kW ;
- le « grand éolien » : machines de plus de 250 kW, dont la puissance dépasse généralement 1 000 kW (= 1 MW).

Plus l'éolienne est puissante, plus le diamètre des pales (ou de l'hélice) est grand et plus le mât est haut.

Le diamètre des pales va de moins de 3 m pour le micro-éolien à plus de 40 m pour le grand éolien.

La hauteur du mât varie d'une petite vingtaine de mètres pour le micro-éolien à plus de 50 m pour le grand éolien.

Exemple :

Puissance électrique débitée par une éolienne dont le rotor de 12 m de diamètre est alimenté par un vent de 36 km/h. Le rendement global est 30%.

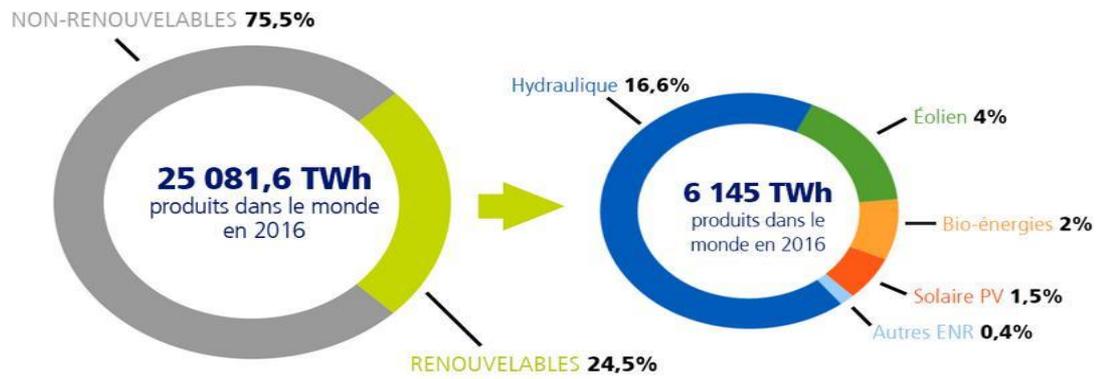
$$P_{\text{électrique}} = (0,3) \cdot \frac{1}{2} \cdot (1,18 \frac{kg}{m^3}) \cdot \pi \cdot \left(\frac{12m}{2}\right)^2 \cdot \left(10 \frac{m}{s}\right)^3 = 20kW$$

Alimentation électrique d'une maison: 120 Volt et 200 Ampères soit 24 kW.

L'éolien en chiffres :

L'ÉOLIEN DANS LE MONDE :

L'Europe a été pionnière dans le développement de l'éolien puis l'Asie et l'Amérique du Nord ont largement pris la tête, installant durablement l'éolien comme source de production d'électricité, soutenue par des politiques de baisse d'émissions de CO2.



Part des renouvelables dans la production mondiale d'électricité en 2016

Source REN21 - 2017

© EDF

L'éolien en mer dans le monde :



Le parc éolien de Teeside dans le Nord-Est de l'Angleterre est composé de 27 turbines et possède une capacité de plus de 3 500 MW ce qui correspond à la consommation annuelle moyenne d'environ 40 000 foyers.

En 2017, la capacité installée mondiale de l'éolien en mer (ou éolien offshore), s'élève à 18,81 GW. Cela représente une progression + 23 % par rapport à 2016.

Le Royaume-Uni (6,84 GW), l'Allemagne (5,35 GW) et la Chine (2,79 GW) occupent le podium des plus grands parcs éoliens en mer.

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire qu'elle provient d'une source que la nature renouvelle en permanence. Cette énergie ne nécessite aucun

carburant et elle ne rejette aucun gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques et radioactifs.

- L'énergie éolienne produit de l'électricité sans dégrader les milieux naturels (pas de dégradation de la qualité de l'air, pas de pollution des eaux et des sols).
- La production éolienne d'électricité est en accord avec notre consommation d'énergie : en hiver, le vent souffle plus souvent, et c'est durant cette saison que la demande d'électricité est la plus forte.
- Lors de l'aménagement de grands parcs éolien, les éoliennes requièrent seulement 2% du sol. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres nombreuses utilisations. Cette installation permet aux propriétaires d'augmenter la valeur de leur terrain : ils reçoivent des intérêts pour l'utilisation de leur sol.
- Les éoliennes attirent aussi des touristes: plus de 75% des touristes se déclarent intéressés par la visite d'une centrale éolienne (sondage 2002 pour l'ADEME). Des visites guidées sont même organisées par certains parcs éoliens: les touristes ont accès à certaines éoliennes et peuvent y monter.

Inconvénients

- L'énergie éolienne est une énergie fatale : c'est-à-dire que l'énergie éolienne est une énergie intermittente, sans vent il n'y a pas de productivité. Elle dépend donc de la topologie du site (les reliefs du sol), des conditions météorologiques et du milieu où se trouve le parc (l'environnement)
- L'aménagement d'un parc éolien requiert des années et des années d'études et d'analyses avant sa construction. Les spécialistes doivent faire de nombreuses études et analyses pour répondre aux démarches administratives et respecter les nombreuses règles, ce qui fait que le nombre de zones possibles est fortement affaibli.
- Quelques personnes habitants à proximité se plaignent d'une pollution sonore: une éolienne peut produire une pollution sonore de plus de 50 dB, ce qui correspond pratiquement au niveau du seuil de la fatigue et de la gêne fixé à 60 dB. Une exposition quotidienne provoque parfois des troubles du sommeil. La pollution sonore est le principal point faible des éoliennes. Cependant, 76 % des riverains n'entendent jamais les éoliennes ; seuls 7 % se disent gênés par le bruit des pales.
- La population aux alentours se plaint aussi d'une pollution visuelle qui gâche les paysages des régions. Mais ce n'est pas le cas pour la majorité des personnes: 71 % d'entre eux estiment que les turbines sont bien intégrées au paysage. Les parcs éoliens doivent par contre être éloignés des monuments et des sites historiques.

Chapitre 6. Energies Eoliennes

- Les éoliennes peuvent aussi s'avérer dangereuses envers la faune: la rotation des pales crée un vortex qui aspire de l'air (par exemple, comme un ventilateur qui marcherait à l'envers). Cette aspiration causerait tort aux oiseaux volants à proximité car ils pourraient être attirés voire tués par les pales (ce fut le cas dans certains parcs éoliens). Elles ne doivent pas être placées sur un axe de migration des oiseaux.



Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.



L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde.

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépend des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est ainsi à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- Le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité ;
- Le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

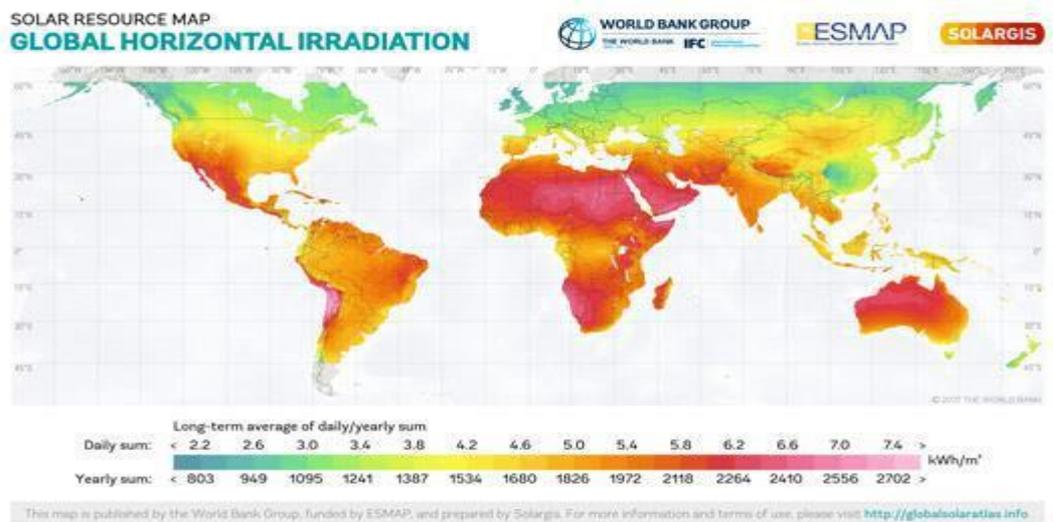
De nombreux programmes de recherche sont en cours afin d'améliorer les rendements des nouvelles technologies d'exploitation de l'énergie solaire.

Fonctionnement technique ou scientifique :

Les caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre :

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil, qui fluctue avec son activité de fusion ;
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui est par exemple importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical ;
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil dans le ciel et donc l'énergie reçue par unité de surface au sol.



Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde.

L'exploitation de l'énergie solaire :

Trois familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui.

L'énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire :

- en usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires ;

- en usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, dessalement, etc.

De fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz (dit « caloporteur ») qui la transporte vers un réservoir de stockage de chaleur.

L'énergie solaire thermodynamique (CSP) :

L'énergie thermique du soleil permet également de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Le principe est identique à celui d'une centrale électrique classique: la production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité. Ce processus nécessite des températures importantes (de 250°C à plus de 1 000°C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs vers un fluide caloporteur.

Parmi les technologies de concentration majeures peuvent être citées :

- les centrales solaires cylindro-paraboliques avec concentration linéaire, équipées d'auges paraboliques ;
- les centrales solaires à miroirs de Fresnel avec concentration linéaire, équipées de lames de miroirs légèrement incurvées ;
- les centrales solaires à tour avec héliostats renvoyant le rayonnement sur le concentrateur
- les paraboles solaires Dish-Stirling avec une concentration ponctuelle, équipées d'un moteur Stirling (moteur à air chaud).

Elles permettent le stockage d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Ce stockage permet de diminuer les conséquences de l'intermittence de la ressource solaire en permettant, par exemple, de continuer à produire de l'électricité après le coucher du soleil.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839), ou la technique associée. L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du soleil directement en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

Bien que comptant encore pour une très faible part de la production mondiale d'électricité (environ 2% en 2017 selon l'AIE (L'Agence internationale de l'énergie)), le solaire photovoltaïque se voit promettre un grand avenir grâce aux progrès attendus, à la baisse des coûts, à sa simplicité et à sa polyvalence. Pouvant fonctionner avec ou sans raccordement à un réseau, elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison (capteurs sur le toit) ou d'une industrie.

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24 heures sur 24, cette application nécessite l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'électricité en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement.

Enjeux par rapport à l'énergie :

Répondre aux enjeux économiques et environnementaux :

L'énergie solaire est souvent considérée comme l'énergie de l'avenir : elle est renouvelable et potentiellement inépuisable à l'échelle humaine. L'enjeu est de taille dans le contexte de dérèglement climatique et de fortes variations des cours des ressources fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole). Ce fort potentiel couplé à la nécessité de réduire les gaz à effet de serre font de l'énergie solaire un axe de développement privilégié aujourd'hui.

Accroître la rentabilité et le rendement :

L'investissement initial dans une centrale solaire est toujours important mais, une fois l'installation amortie, ses frais de fonctionnement sont faibles. De nombreux pays ont mis en place des systèmes d'incitation financière (sous forme de détaxation, de subventions, ou de tarifs avantageux pour le rachat de l'énergie produite) afin d'encourager l'innovation et les premières installations.

L'utilisation de ces systèmes de production d'énergie solaire se justifie immédiatement dans les situations où il est très coûteux de transporter des combustibles (fossiles), de procéder à un raccordement au réseau électrique, comme pour des appareils isolés (balises marines, horodateurs) ou dans des zones isolées ou peu peuplées.

Unités de mesure et chiffres clés :

Joule :

L'énergie est mesurée en joules (J) et la puissance est mesurée en watts (W). Un joule égale un watt pendant 1 seconde.

1 kJ = 10^3 J soit 1 000 J.

1 MJ = 10^6 J soit 1 000 kJ.

1 GJ = 10^9 J, soit 1 000 MJ.

L'énergie solaire totale absorbée chaque année par l'atmosphère terrestre, les océans et les terres avoisinerait 3 850 zettajoules (1 ZJ = 10^{21} J).

Pour rappel, la consommation mondiale d'énergie primaire a atteint 14301 Mtep en 2018 selon le rapport annuel « Global Energy and CO2 Status » de l'AIE, soit environ 600 exajoules (1 EJ = 10^{18} J).

Passé et présent :

1839 : Antoine Becquerel (1788-1878) découvre le phénomène photovoltaïque et invente la pile photovoltaïque.

1912 : première mise en œuvre d'un capteur cylindro-parabolique inventé par Charles Vernon Boys (1855-1944), un physicien anglais.

1949 : Félix Trombe (1906-1985), un chimiste française, développe les systèmes passifs de chauffage solaire et notamment le « mur Trombe ». Il participe également au développement des fours solaires successifs du site d'Odeillo.

1959 : lancement de Vanguard I, le premier satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque.

Années 70 : les deux chocs pétroliers relancent l'intérêt porté aux énergies solaires.

Années 80 : les développements sont freinés pour des raisons de rentabilité liées notamment aux technologies trop coûteuses.

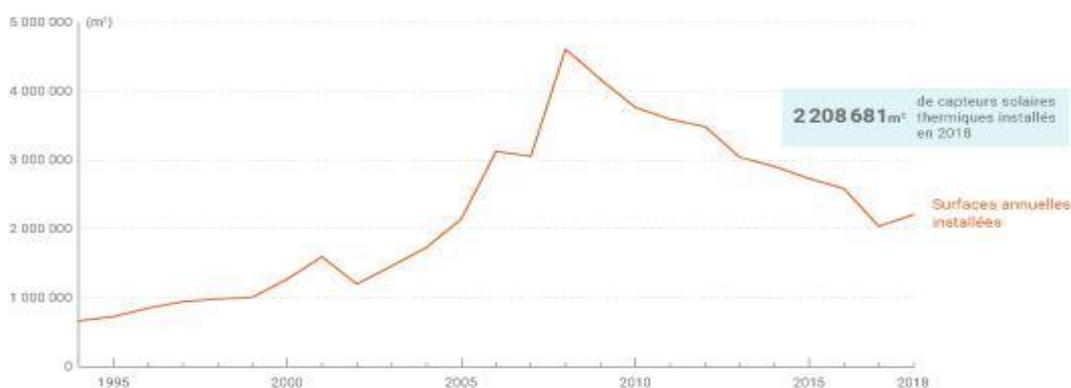
Années 1990 : un nouvel essor s'amorce.

Années 2000 : les énergies solaires thermique et photovoltaïque se développent rapidement en France. Entre 2007 et 2009, leurs productions énergétiques respectives ont été multipliées par 2 et par 7.

2012 : la puissance photovoltaïque mondiale raccordée aux réseaux dépasse la barre des 100 GW.

À **fin 2017** : les capacités photovoltaïques mondiales avoisineraient 400 GW électriques selon l'AIE. Les capacités solaires thermiques déployées dans le monde atteindraient quant à elles 472 GW thermiques.

Solaire thermique Évolution des surfaces installées dans l'Union européenne



Source : EuroObserv'ER 2019

Avec 19 269 490 m² de capteurs solaires thermiques à fin 2018 (et 573 500 m² installés en 2018), l'Allemagne est de loin le pays où la filière s'est le plus développée dans l'Union européenne. (©Connaissance des Énergies, d'après EurObserv'ER).

Futur :

Dans le monde, des projets de centrales électriques voient le jour presque partout. Selon Patrick Jourde et Jean-Claude Muller, chercheurs au Commissariat de l'énergie atomique (CEA) et au CNRS, 5% de la surface des déserts permettraient de produire toute l'électricité dont a besoin la planète.

L'électricité d'origine solaire (solaire photovoltaïque et thermodynamique confondus) pourrait représenter jusqu'à 20% à 25% de la production mondiale d'électricité d'ici 2050, estimait l'AIE en mai 2010 lors de la Conférence plan solaire méditerranéen organisée par la présidence espagnole de l'UE.

Le saviez-vous ?

Les photons, composants de la lumière et donc du processus de transmission de l'énergie solaire, voyagent dans le vide à 299 792 458 mètres par seconde. C'est la vitesse maximale qu'un objet puisse atteindre dans notre univers, selon la physique relativiste. La lumière émise par le Soleil ne met ainsi que 8 minutes pour parcourir les 150 millions de kilomètres qui séparent la Terre du Soleil.

Solaire photovoltaïque :



Définition et catégories :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.

« L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible en très grandes quantités. »

Ce processus ne nécessite aucun cycle thermodynamique intermédiaire, c'est-à-dire que le rayonnement est directement converti en électricité sans utilisation intermédiaire de la chaleur (contrairement au solaire thermodynamique).

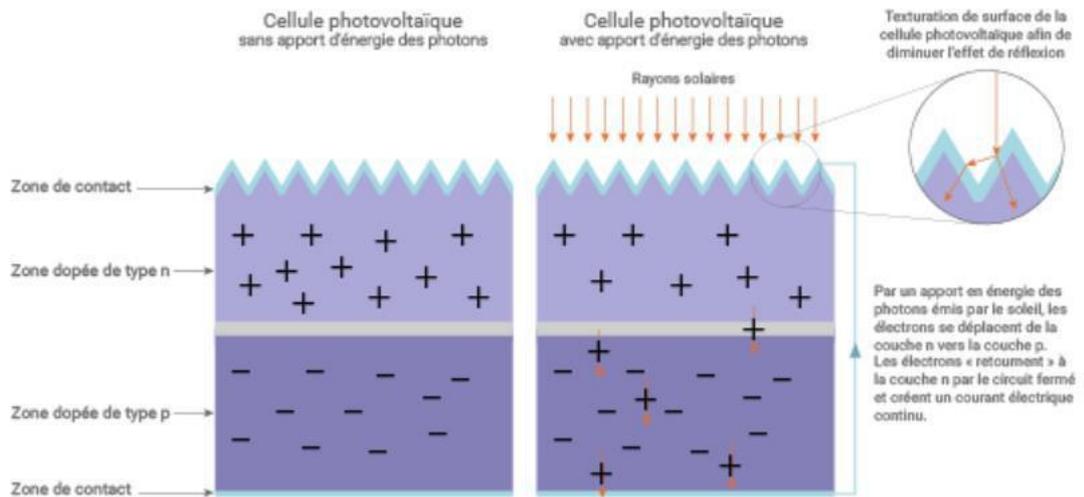
Fonctionnement scientifique :

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de **silicium** compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de **phosphore** qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de **type n** comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de **bore** qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de **type p** comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**.



Constitution d'une cellule photovoltaïque.

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de **silicium** des deux couches **n** et **p**. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche **p**, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche **n**. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

Etat des lieux des technologies traditionnelles :

Le solaire photovoltaïque non concentré :

Les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial

□ Les cellules monocristallines

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

□ Les cellules polycristallines

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre.

- Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules polycristallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé de 12% à 17% selon l'institut allemand Fraunhofer.

Technologies prometteuses

Le solaire photovoltaïque concentré

Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. A puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe.

Cette technologie devrait pénétrer le marché dans un avenir proche.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-electron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %). Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46%⁴.

Les constituants organiques (polymères)

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques.

D'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements dépassant légèrement 10% en laboratoire mais pourraient servir de base au développement d'une filière industrielle.

Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique.

Enjeux par rapport à l'énergie

Avantages

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.
- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle (par exemple, la ferme solaire).

« Une cellule photovoltaïque traditionnelle doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer. »

Limites

- La technologie photovoltaïque est encore coûteuse même si son coût de production a fortement baissé au cours des dernières années (avec un coût de production de 70 à 90 \$/MWh dans certaines zones aujourd'hui, des installations photovoltaïques atteignent parfois localement une « parité de prix » avec des moyens « conventionnels » de production électriques).
- Les panneaux photovoltaïques les plus répandus, faits de silicium cristallin, sont lourds, fragiles et difficiles à installer.
- Une centrale requiert de vastes espaces bien que la densité tende à être améliorée.
- L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul.
Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.
- L'énergie électrique n'est pas « directement » stockable, c'est-à-dire sous sa forme primaire. Il est en revanche possible de la stocker « indirectement » dans des batteries sous forme chimique ou dans des accumulateurs cinétiques sous forme mécanique. Les technologies existantes sont encore coûteuses.

Unités de mesure et chiffres clés

Watt crête

La puissance « crête » d'une installation photovoltaïque (exprimée en **Wc**) est la puissance maximale (capteurs bien orientés, bien inclinés, sans ombrage) qu'elle peut produire sous un ensoleillement donné.

Cette unité a trois utilisations principales :

- la comparaison du rendement des matériaux photovoltaïques, dans les mêmes conditions ;
- la qualification de la taille d'une installation, indépendamment de ses conditions d'ensoleillement ;
- la comparaison des gisements solaires et de leur production électrique.

A fin 2016, la capacité installée du parc mondial solaire photovoltaïque a dépassé 300 gigawatts (GW) installés, selon la PV Market Alliance.

En 2014, le solaire (photovoltaïque et thermodynamique inclus) a généré près de 197,1 TWh d'électricité dans le monde, soit environ 0,8% de la production mondiale d'électricité selon les dernières données de l'Irena (International Renewable Energy Agency).

Selon l'AIE (L'Agence internationale de l'énergie), les filières photovoltaïque et thermodynamique auront des contributions équivalentes en 2050 en termes de production énergétique. Environ 80% de la production mondiale de modules photovoltaïques est encore à base de plaquettes de silicium cristallin. Le reste utilise des couches minces déposées sur une surface, solution plus économique en matière de coûts de fabrication mais avec des rendements inférieures.

Passé et présent

1839 : Antoine Becquerel publie un mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatif à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant.

1877 : W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium, et C. Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium.

1905 : Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique, ce pour quoi il obtient un prix Nobel en

1921.

1954 : D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, deux ingénieurs des Bell Telephone Laboratories (États-Unis), annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque.

1959 : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques.

Années 1970 : les crises pétrolières renforcent l'intérêt et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque.

1978 : le premier mégawatt crête installé est atteint dès 1978.

De 2010 à 2016 : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW).

Futur

L'industrie du photovoltaïque se tourne aujourd'hui vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future.

Enfin, la recherche sur le stockage d'électricité sera également importante. Ce thème transversal de l'énergie concerne plus particulièrement le solaire photovoltaïque puisque le caractère compétitif de cette technologie dépendra beaucoup de la capacité à adapter sa production pour répondre aux besoins ponctuels.

Le saviez-vous ?

En une heure, le soleil produit plus d'énergie que l'humanité n'en consomme en un an.

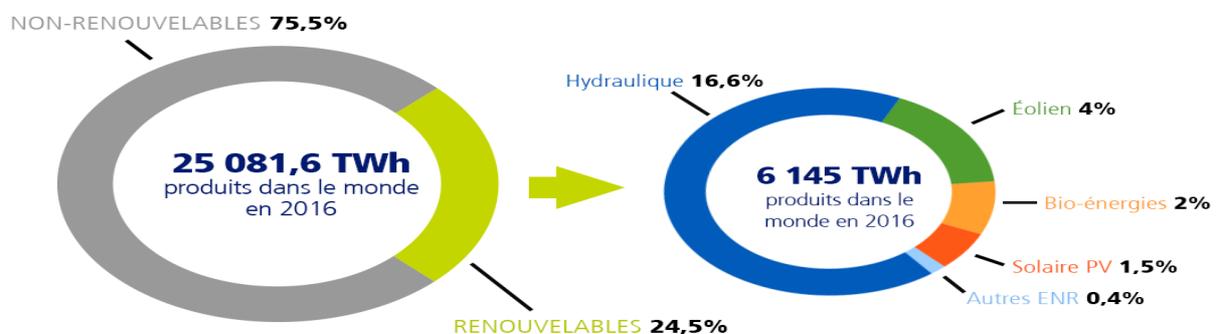
Le solaire photovoltaïque en chiffres :

Parmi les Énergies Renouvelables, le solaire occupe encore une place minime mais connaît une très forte progression depuis quelques années.

LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DANS LE MONDE :

En 2016, près de 75 GW de panneaux photovoltaïques ont été installés dans le monde. Cela équivaut à l'installation de plus de 31 000 panneaux photovoltaïques par heure et représente une croissance de 48 % par rapport à 2015.

La puissance installée mondiale en matière de solaire photovoltaïque s'élève **en 2016 à 303 GW**.



Part des renouvelables dans la production mondiale d'électricité en 2016

Source REN21 - 2017

© EDF

Solaire thermodynamique (à concentration) :



Définition et catégories

Un système solaire à concentration thermodynamique exploite le rayonnement du soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés.

Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1 000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité (on parle parfois « d'électricité solaire thermodynamique »).

D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène.

Le principe de concentration

Le principe de la concentration de l'irradiation solaire est connu depuis l'Antiquité, comme l'illustre le mythe des « miroirs ardents » d'Archimède. Le plus souvent grâce à des miroirs réfléchissants ou des loupes, un système à concentration réoriente le rayonnement solaire collecté par une surface donnée sur une cible de dimension plus réduite : le démarrage d'un feu de feuilles mortes avec une loupe utilise ce principe.

Le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température.

Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling.



Fonctionnement technique ou scientifique

Les différents types de centrales

□ **Systèmes de concentration linéaire**

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tube(s) absorbeur(s) installé(s) le long de la ligne focale des miroirs. Ce tube contient un fluide caloporteur porté à une température de l'ordre de 250 à 500°C.

Les miroirs réfléchissants suivent le mouvement du Soleil tout au long de la journée.

- **Centrales à miroirs cylindro-paraboliques:** c'est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Le foyer d'une parabole est un point, celui d'un miroir cylindro-parabolique est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur (le récepteur) de couleur noire, pour capter un maximum de rayonnement.

Dans ce tube circule le fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température d'environ 500°C et qui est ensuite centralisé et transporté jusqu'au bloc de génération électrique. L'ensemble miroir cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du Soleil.

Exemples : Andasol, une des plus puissantes centrales thermodynamiques d'Europe située en Espagne (150 MW) ; Nevada Solar One aux États-Unis (64 MW).



Miroirs cylindro-paraboliques d'Andasol, Espagne

- **Centrales solaires à miroirs de Fresnel**: plutôt que de courber les miroirs (processus industriel coûteux), les miroirs de Fresnel « miment » la forme cylindro-parabolique avec des miroirs très légèrement incurvés, et placés à un même niveau horizontal. Seuls les miroirs bougent, la structure et le tube absorbant sont tous deux stationnaires. Les coûts des centrales solaires à miroirs de Fresnel sont donc inférieurs à ceux des centrales à miroirs cylindro-paraboliques tant à l'installation qu'à la maintenance. La focalisation est toutefois dégradée dans ce système (puisque la parabole n'est pas parfaite) : le pari est donc que la baisse de coût « compense » la dégradation de l'efficacité d'un point de vue économique. Ce type de système est encore relativement peu répandu.

Exemples : Puerto Errado en Espagne (31,4 MW), Kimberlina en Californie (5 MW).



Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel

Systèmes de concentration par foyer

Le rayonnement solaire est concentré environ 1 000 fois à destination d'un foyer unique de taille réduite. La température peut atteindre de 500 à 1 000°C.

- **Centrales à tour:** des centaines de miroirs suivant la course du soleil (les « héliostats ») réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur. Comme dans les systèmes cylindro-paraboliques, la chaleur du fluide est alors transférée à un cycle classique à vapeur pour générer de l'électricité. Par rapport à un système cylindro-parabolique, la tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs : les pertes thermiques sont donc significativement réduites.

Par ailleurs, le niveau de concentration de l'irradiation peut être bien supérieur et l'efficacité du cycle thermodynamique s'en trouve augmentée. Il reste que ces gains techniques doivent aussi se traduire par un gain technico-économique, limité par le coût de construction de la tour.

Exemples : Crescent Dunes au Nevada (110 MW), Solar Tres en Espagne (19,9 MW), projet PEGASE sur le centre français de Thémis (Pyrénées-Orientales).



Tour solaire à concentration

- **Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling:** une parabole concentre le rayonnement sur un foyer en son point focal afin d'actionner un moteur dit « Dish-Stirling ». Une fois chauffé dans un circuit fermé, le gaz qu'il contient actionne un piston qui récupère l'énergie mécanique produite. Cette technologie n'est pas adaptée à une production industrielle de masse du fait de son coût élevé, d'où le retard de son développement.

Cependant, c'est la seule technologie thermodynamique qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petite taille.

Exemple : site de Font-Romeu Oreillo, siège des recherches du CNRS sur le sujet.



Paraboles solaires Dish-Stirling testées à Albuquerque au Nouveau-Mexique

LES PILES À COMBUSTIBLE

Les **piles à combustible** convertissent directement en électricité l'énergie chimique de combustibles divers (*sans combustion*), avec de multiples avantages : une grande modularité permettant des montages très variés avec une très grande facilité d'insertion (y compris dans des unités préfabriquées), une flexibilité d'installation très forte quel que soit l'emplacement d'utilisation, de grandes facilités de maintenance dues à l'absence de pièces mobiles et à la facilité de remplacement in situ des composants, une absence quasi-totale de dégagement de polluant (de CO₂ en particulier) le seul rejet étant celui d'eau très pure, un rendement élevé de production d'électricité (très supérieur à celui des solutions classiques), un rendement pratiquement indépendant de la charge l'équipement pouvant facilement être très voisin du point d'utilisation, des temps de réponse extrêmement courts, un fonctionnement très silencieux. Le *seul obstacle significatif* est le **coût**.

Le fonctionnement des piles à combustible

La partie centrale d'une pile à combustible est une membrane électrolytique (voir ci-dessous) avec :

- sur la première face une anode (électrode négative repoussant les électrons),
- et sur la deuxième face une cathode (électrode positive attirant les électrons).

Voici ce qui se passe avec la traversée de l'hydrogène (combustible type), de l'anode vers la cathode.

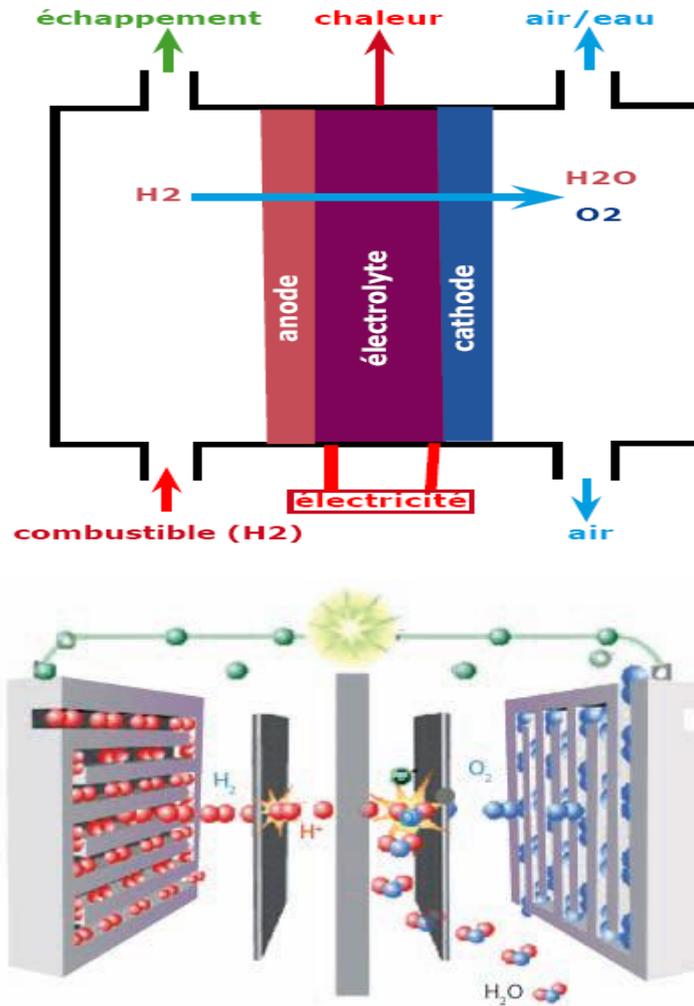
1. L'hydrogène fourni à la pile pénètre dans celle-ci par la face anodique, où une couche de platine favorise la décomposition de l'hydrogène en électrons et en protons.
2. La membrane électrolytique laisse passer les protons, mais s'oppose au passage des électrons, qui sont recueillis séparément sur la première face afin de fournir le courant électrique.
3. L'oxygène, transitant vers la cathode, y rencontre une autre couche de platine qui provoque la combinaison de l'oxygène avec des électrons, fournissant de l'eau et de la chaleur.

Les avantages majeurs

1. L'ensemble des processus revient à une conversion directe de l'énergie chimique en électricité, au contraire des systèmes courants (transformation de l'énergie chimique en énergie thermique).
2. Utilisées en production décentralisée d'électricité les piles à combustible présentent un double avantage :
 - une réduction significative de la consommation d'énergie par rapport à des solutions plus traditionnelles,
 - une réduction très forte des émissions de polluants.

Chapitre 8. Les Piles à Combustible

3. S'ajoute la possibilité de faire appel à de multiples combustibles, avec un fonctionnement très silencieux, des coûts de maintenance a priori très réduits. Au contraire des batteries électriques les réactifs cathodiques et anodiques possèdent l'avantage de se renouveler régulièrement à partir de l'air et du combustible.



L'inconvénient majeur

Le seul obstacle significatif restant celui du coût, il est possible d'espérer que les recherches en cours permettront d'atténuer, sinon de supprimer ce défaut, mais les prévisions ne sont pas probantes, et il règne encore beaucoup d'incertitudes (voir ci-contre les prévisions concernant la période 2015-2020).

Les caractéristiques électriques et le rendement

La membrane électrolytique, l'élément de base de toutes les piles à combustible. ne produisant qu'une tension assez faible, de l'ordre de 0,7 [V], il faut en empiler plusieurs pour obtenir une tension suffisante. Les performances en découlent comme suit: le nombre de membranes fixe la tension, la surface de membranes fixe l'intensité du courant, le produit des deux fixe la

Chapitre 8. Les Piles à Combustible

puissance. Le rendement global (toutes pertes des auxiliaires prises en compte) varie (selon les piles) de 35 à 55 % en production électrique. Si la production de chaleur est utilisée (cogénération) le rendement peut atteindre 75 à 90 %. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que l'efficacité est largement indépendante de la charge lorsque celle-ci varie de 20 à 100 %.

LES TYPES DE PILES À COMBUSTIBLE

Chaque type de piles à combustible est caractérisé par l'électrolyte adopté. Si l'on excepte les piles «AFC» (à la potasse), quatre catégories sont actuellement envisagées pour les applications bâtiments, applications désignées par leur sigle anglophone. Il s'agit :

- des piles dites PEMFC (ou PEFC),
- des piles dites MCFC,
- des piles dites SOFC,
- des piles dites PAFC.

Ces différentes catégories sont caractérisées par les électrolytes suivants.

1. Les piles «PEMFC» (ou «PEFC»), «proton exchange membrane fuel cells», possèdent un électrolyte qui est une membrane polymère.
2. Les piles «MCFC», «molten carbonate fuel cells», possèdent du carbonate de lithium fondu comme électrolyte.
3. Les piles «SOFC», «solid oxide fuel cells», possèdent une céramique (normalement de l'oxyde de zirconium) comme électrolyte.
4. Les piles «PAFC», «phosphoric acid fuel cells», possèdent un électrolyte à base d'acide phosphorique.

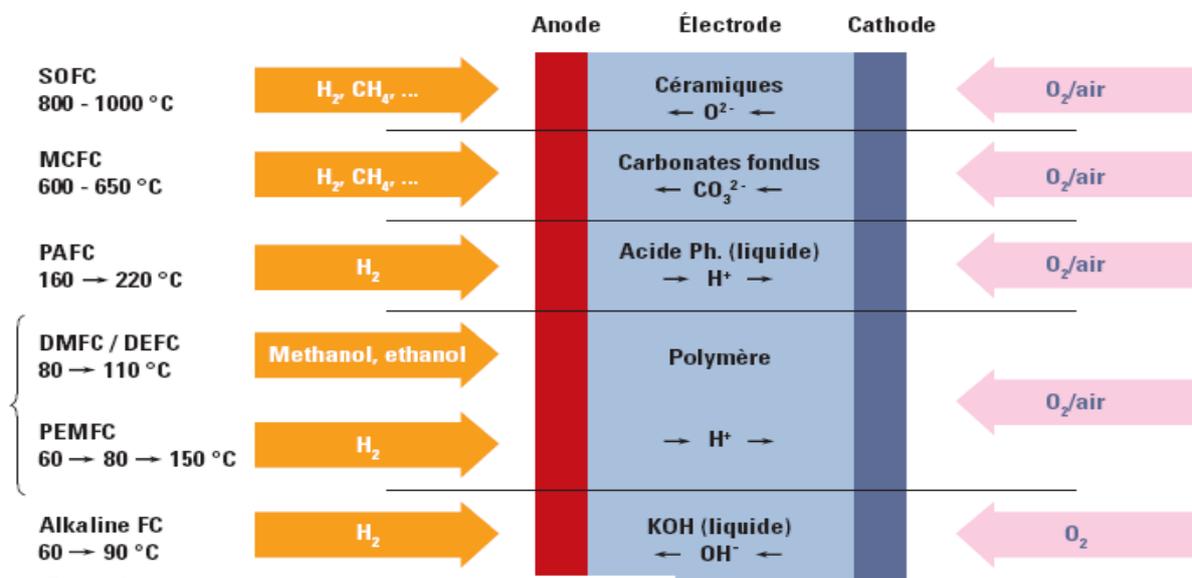


FIGURE 4
Différents types de piles à combustible.

Un exemple (PEFC) : les avantages

Dans les piles PEFC (ou PEMFC) la couche électrolytique centrale est un polymère conducteur de protons. Sur les deux faces de la membrane l'anode (d'un côté) et la cathode (de l'autre côté) sont des couches électrolytiques à base de platine fixées sur des particules de carbone. Cette version possède trois avantages de base :

- celui de fonctionner à relativement basse température : 60 à 90 °C, ce qui limite évidemment (mais sans plus pour ce qui nous concerne) ses domaines d'emploi,
- celui d'une mise en régime très rapide, d'une assez grande simplicité,
- celui d'une absence d'émissions polluantes (si on utilise de l'hydrogène comme combustible).

Les inconvénients

Pour le moment les coûts d'investissement et de maintenance restent encore assez élevés : s'ils ne deviennent pas rapidement acceptables les piles à combustible resteront des curiosités. Hors de cet aspect général l'inconvénient principal est que la pile doit fonctionner à partir d'un combustible qui ne peut guère être que de l'hydrogène pur, lequel peut être produit à partir de charbon, de gaz naturel ou de fermentations. Il est essentiel que le combustible, comme la combustion, soient d'une excellente propreté, ce qui est peut-être la servitude la plus lourde. Les impuretés telles que monoxyde de carbone (à des niveaux de quelques millièmes) ou les composés sulfureux (à des niveaux de quelques milliardièmes) doivent être éliminés afin de n'utiliser que de l'hydrogène d'une pureté d'au moins 99,999 %.

La nécessité de disposer d'une source d'hydrogène pur ne peut guère être satisfaite que dans les situations suivantes : ou bien nous disposons d'un réseau collectif de distribution d'hydrogène pur, soit sous forme gazeuse (en canalisations) soit sous forme solide (en camions), ou bien nous fabriquons cet hydrogène localement, vraisemblablement par reformage de gaz naturel. Dans ces deux cas l'avantage économique des piles restera difficile à justifier, la production et la distribution d'hydrogène pur n'étant «gratuite» ni au plan énergétique ni au plan environnemental. Malgré les progrès déjà accomplis l'avenir des piles à combustible reste donc encore assez incertain.