

I. GÉNÉRATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Introduction

L'électricité peut être produite en déplaçant un fil conducteur tel que le cuivre dans un champ magnétique. Une génératrice électrique est une machine qui contient des fils logés à l'intérieur d'un aimant. Quand le générateur tourne, les fils se déplacent à l'intérieur du champ magnétique et produisent le courant électrique. Pour produire les grandes quantités de l'électricité dont nous avons besoin pour notre industrie, et nos maisons, nous avons besoin d'usines de pouvoir étendu pour tourner le générateur. La plupart des sites de production d'électricité commencent par le processus de tournage de l'arbre du générateur électrique avec la chaleur. Les usines de production brûlent le pétrole, le charbon ou le gaz naturel pour obtenir la chaleur. Les centrales nucléaires utilisent la fission de l'uranium pour obtenir la chaleur. Dans tous les cas, la chaleur est utilisée pour bouillir l'eau à la vapeur (Fig. I-1). La vapeur est ensuite utilisée pour faire tourner l'arbre des turbines (un axe avec les lames incurvées) lequel est fixé au générateur. Les lames de l'arbre des turbines, en rotation, tournent le générateur, qui produit le courant électrique. Ce courant est alors prêt pour être transmis aux maisons, aux usines et ailleurs par l'intermédiaire des lignes de transmission et poste de distribution de service public d'électricité.

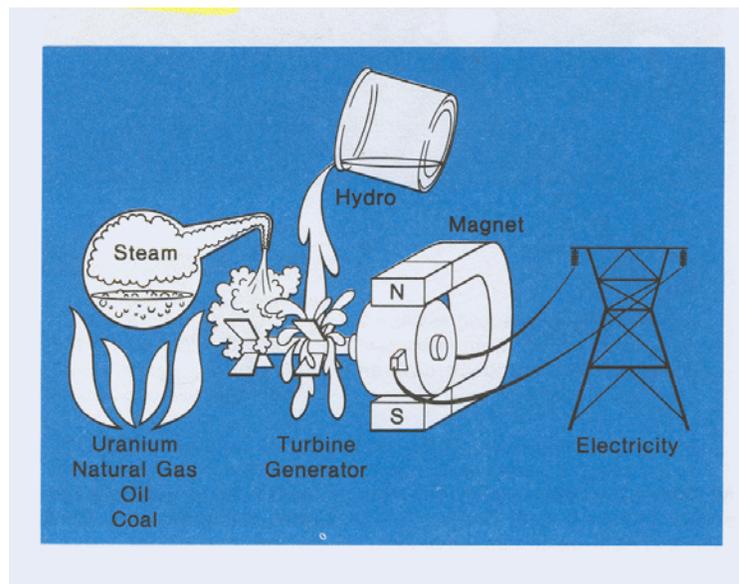


Fig. I-1 : Principe de base de la génération d'énergie.

Une autre machine appelée condenseur utilise l'eau froide, provenant d'un lac ou d'un fleuve voisin, pour changer la vapeur de turbine en une eau, qui est envoyée de nouveau à la chaudière pour commencer un autre cycle. Les grandes tours ouvertes que l'on peut observer à côté des centrales sont des tours de refroidissement, où l'eau utilisée par le condenseur est refroidie avant qu'elle soit retournée au fleuve ou au lac d'où elle est venue. Les nuages blancs gonflés provenant de ces tours sont des vapeurs d'eau.

Au lieu de la chaleur, les centrales hydroélectriques utilisent l'eau en chute, circulant sur les barrages 'artificiels', pour la rotation des lames de turbine, et pour ainsi faire tourner l'arbre du générateur électrique.

1- LES CENTRALES THERMIQUE

1.1 Principe de fonctionnement des centrales thermiques à flamme

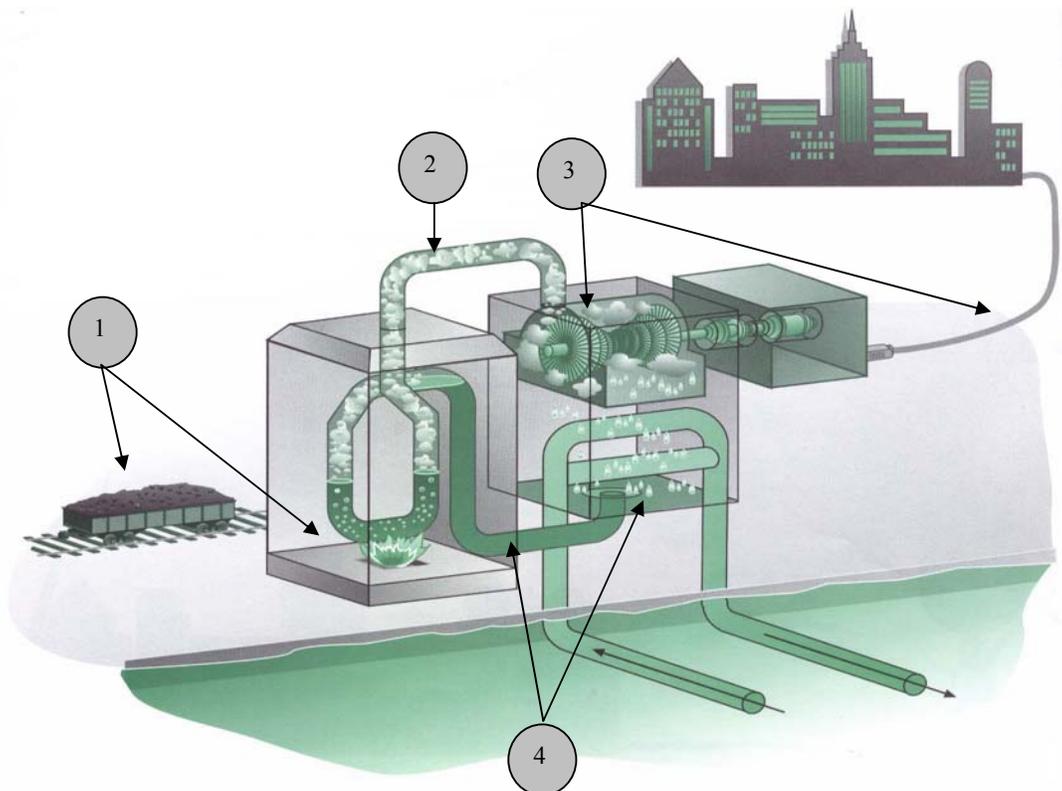


Fig. I-2 : Schéma simplifié de la génération d'énergie à partir d'une centrale thermique.

Les centrales thermiques classiques, appelées aussi centrales thermiques à flamme, produisent de l'électricité par combustion de charbon, de fioul, de gaz naturel ou de gaz des hauts fourneaux.

Le fonctionnement d'une centrale thermique se divise en quatre étapes: un combustible est brûlé (1) et fournit de la chaleur dans un générateur de vapeur où de l'eau est vaporisée sous pression (2). La vapeur est alors "détendue" dans une turbine, ce qui signifie qu'elle passe d'une haute pression initiale (environ 165 bars) à une basse pression (environ 50 millibars). La détente de la vapeur provoqué par cette baisse de pression permet d'entraîner la turbine et l'alternateur qui produit l'électricité (3). La vapeur est ensuite liquéfiée dans un condenseur (4) puis recyclée.

1.2 Les combustibles

Les combustibles sont de trois types : charbon, fioul ou gaz.

Combustible	Capacité de la tranche	Consommation (à l'heure)
charbon	250 MW	100 tonnes
fioul	250 MW	50 tonnes
gaz naturel	125 MW	30 000 m ³
gaz hauts fourneaux	125 MW	60 000 m ³

Le charbon est transformé en fines particules dans des broyeurs, mélangé à l'air réchauffé et injecté sous pression dans la chambre de combustion par des brûleurs. Le fioul est chauffé à 140°C pour accroître sa fluidité, puis il est injecté dans la chaudière à l'aide de brûleurs appropriés. Le gaz utilisé (gaz naturel ou gaz de hauts fourneaux doté d'un pouvoir calorifique moindre) ne nécessite aucun traitement préalable et est directement envoyé dans la chaudière.

1.3 La source chaude

Le combustible brûle dans le générateur de vapeur (ou chaudière) qui est tapissé de tubes à l'intérieur desquels circule l'eau à chauffer. Celle-ci se vaporise autour de 560°C et la pression

atteint 180 bars environ. Dans une centrale de 250 MW, 720 tonnes de vapeur haute pression sont produites à l'heure.

1.4 La turbine à vapeur

La vapeur est progressivement détendue dans une turbine (appelée turbine haute pression, HP) et passe à travers une série de roues mobiles équipées d'ailettes, ce qui entraîne la rotation d'un alternateur (à 3 000 tours/minute pour une centrale de 250 MW) : le générateur d'électricité. La vapeur ne transmet pas toute son énergie thermique dans la turbine HP. Un circuit séparé renvoie la vapeur vers la chaudière pour être "re-surchauffée" et passer ensuite dans la turbine dans le corps moyenne pression (MP) puis dans le corps basse pression (BP). Au fur et à mesure de la détente, la pression de la vapeur diminue. Pour récupérer le maximum d'énergie mécanique, les ailettes des trois corps de turbines (HP, MP, BP) ont une taille inversement proportionnelle à la pression. A la fin, la vapeur s'échappe avec une pression de 50 mbars.

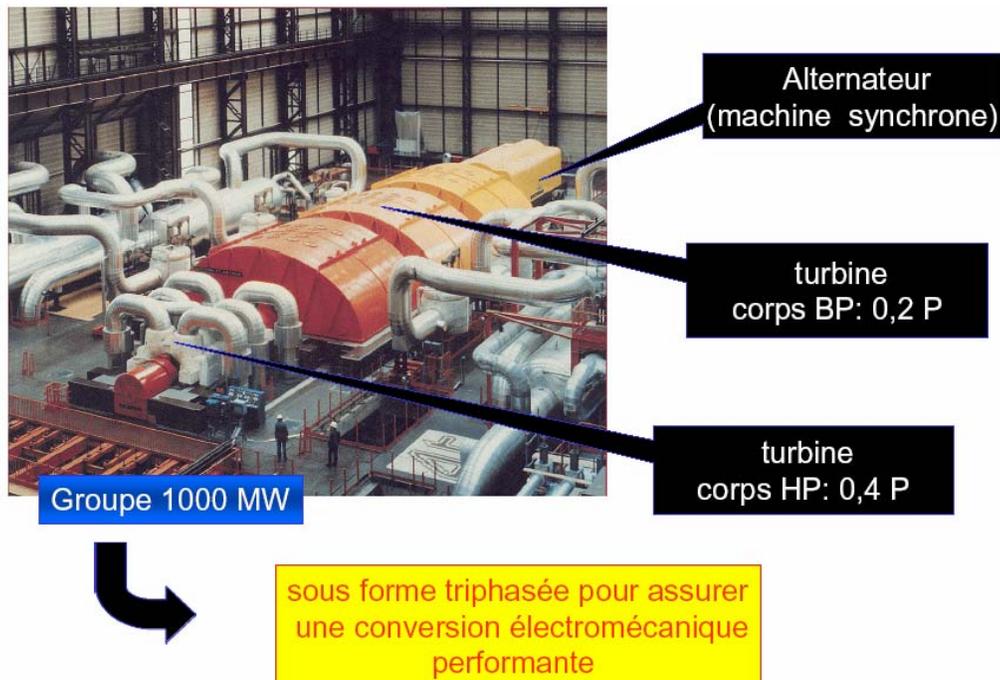


Fig. I-3 : Vue d'ensemble d'une centrale thermique.

1.5 La source froide

L'eau vaporisée est condensée dans un échangeur (appelé condenseur) composé de milliers de tubes de petit diamètre dans lesquels circule l'eau de refroidissement, généralement prélevée dans un cours d'eau ou de l'eau de mer (puis restituée ensuite). L'eau re-condensée est récupérée par des pompes d'extraction et subit un cycle de réchauffage pour être à nouveau introduite dans le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

1.6 Et le rendement ?

Au début du siècle le rendement des centrales thermiques à flamme était de 13 %, il atteint 38 % pour les tranches mises en service après la deuxième guerre mondiale et atteint même jusqu'à 55 % pour les centrales dites à cycle combiné.

Ce progrès est principalement dû à l'augmentation de la température et de la pression de la vapeur (rendues possible par les progrès dans la métallurgie), et, dans les cycles combinés, à la récupération des gaz à l'échappement de la turbine, pour la production de vapeur alimentant un second groupe turbo-alternateur.

1.7 Les centrales Thermiques à flamme et la pollution de l'air

1.7.1 Émissions de dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre (SO_2) est l'un des principaux responsables de la pollution atmosphérique urbaine. Il provoque des effets néfastes sur l'appareil respiratoire et se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4) au contact de l'humidité de l'air, contribuant ainsi à la formation des pluies acides (dégradation des bâtiments, le dépérissement des forêts). Pour limiter les rejets soufrés de ses centrales thermiques à flamme, on développe l'utilisation de fioul à très basse teneur en soufre (moins de 1 %) : les rejets sont alors divisés par trois par rapport à un fioul habituel (3 % de soufre). Concernant la combustion du charbon, deux types de procédés :

- lavage des gaz (désulfuration aval). Le lavage des gaz est employé pour les installations récentes. Son rendement de désulfuration est important (90 %). Le coût d'investissement est élevé, rentabilisé si l'utilisation des centrales est soutenue.
- Pour les tranches plus anciennes, on utilise l'injection de calcaire ou de chaux dans le foyer de la chaudière. Le soufre est transformé en sulfate de calcium et récupéré dans les dépoussiéreurs avec les cendres volantes.

1.7.2 Émissions d'oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO_x) sont formés dans la flamme par réaction chimique entre l'oxygène de l'air (O_2) et l'azote de l'air (N_2) et les composés azotés contenus dans le combustible. Parmi les différents oxydes, N_2O est un gaz à effet de serre et NO_2 se révèle toxique pour l'homme à très forte concentration. Le secteur du transport est de loin le principal responsable des émissions de NO_x , alors que la part émise par les centrales thermiques est très faible (moins de 3 %).

Deux moyens sont utilisés pour réduire les émissions de NO_x . L'un consiste à diminuer la formation des oxydes en étageant la combustion et réduisant la température de la flamme. Dans ce cas, la dénitrification est appelée primaire.

L'autre procédé consiste à effectuer une dénitrification des fumées en aval de la chambre de combustion : les oxydes sont alors décomposés en azote et oxygène.

1.8 Les nouvelles filières

En raison des importantes réserves naturelles disponibles, le charbon va jouer un rôle important dans le futur. Il devient donc essentiel de développer des technologies de combustion propre, respectueuses de l'environnement. Ces nouvelles technologies pourraient remplacer partiellement et progressivement la technologie actuelle (charbon pulvérisé en chaudière). Deux procédés ont atteint un degré de développement significatif : les chaudières à lit fluidisé circulant (LFC) ou le système de gazéification du charbon intégré à un cycle combiné (GICC).

Pour se conformer aux nouvelles contraintes de protection de l'environnement, les centrales thermiques à flamme doivent s'adapter et diminuer leurs émissions polluantes provenant des fumées de combustion. Pour cela, les centrales peuvent être équipées soit de dispositifs de désulfuration primaire limitant l'apparition d'oxydes de soufre (SO_2) dans la chaudière, soit de dispositifs de lavage des fumées, appelé encore désulfuration aval.

L'utilisation du fioul à très basse teneur en soufre : ce combustible spécialement traité contient moins de 1% de soufre après traitement contre 3 % habituellement. Cette mesure très efficace et coûteuse concerne bien sûr les centrales brûlant du fuel en combustible principal, mais aussi les centrales brûlant du charbon en combustible principal et du fuel au démarrage.

L'adaptation des centrales récentes de forte puissance avec la mise en place d'installations de lavage des gaz de combustion (désulfuration aval). Avant d'atteindre la cheminée, les fumées sont refroidies, lavées dans un brouillard d'eau saturée en calcaire qui forme, par réaction, du gypse. Les gaz lavés puis réchauffés sont renvoyés à la cheminée déchargés de 90 % d'oxyde de soufre. Ce système s'avère très coûteux et il est réservé aux centrales récentes de forte puissance. Le sous-produit de la désulfuration est du gypse de qualité utilisable dans la fabrication du ciment et du plâtre.

2- LES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES

2.1 Principe de fonctionnement

Le premier impératif est d'avoir de l'eau, beaucoup d'eau. Le rôle du barrage consistera à la retenir.

1 - Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau, sauf en cas de forts débits, qu'il laisse alors passer. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.

2 - Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.

La puissance disponible tirée de la chute de la masse d'eau est donnée par :

$$P=9,8 H Q$$

P = puissance disponible en kW

H = hauteur de la chute en m

Q = débit moyen en m³/s.

3 - A la sortie de la conduite, la pression ou la vitesse (ou les deux en même temps) entraîne la rotation de la turbine.

4 - La rotation de la turbine entraîne celle du rotor de l'alternateur.

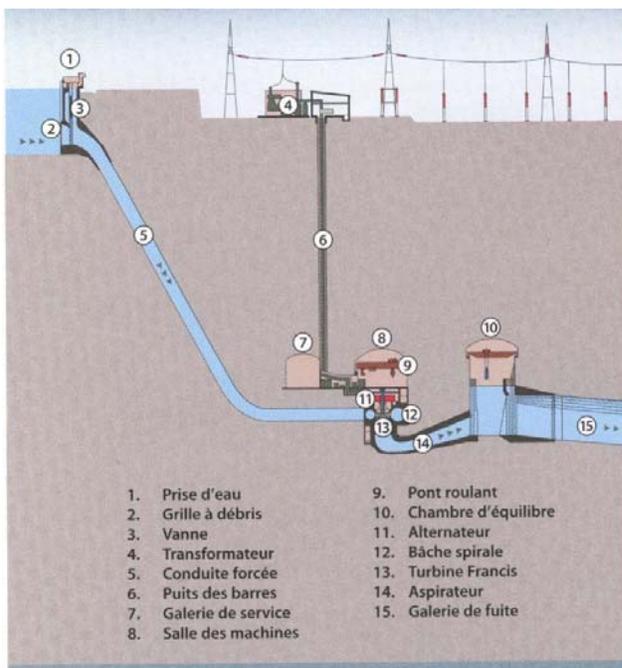
5 - Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute et très haute tension.

6 - L'eau turbinée qui a perdu son énergie s'échappe par le canal de fuite et rejoint la rivière.

La Figure II-4 représente deux exemples de construction de centrales hydroélectriques au Québec tandis que le Tableau II-1 présente leur fiches techniques.

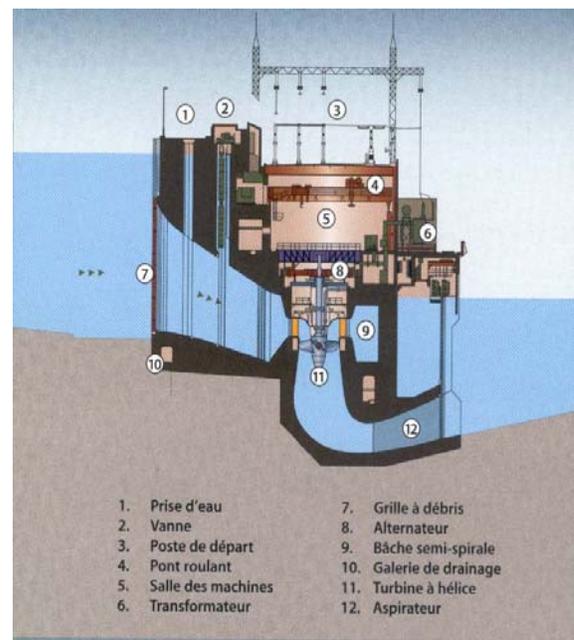
2.2 Stocker l'eau, c'est stocker l'électricité

En grande quantité, l'électricité n'est pas stockable. En revanche, l'eau peut être emmagasinée dans des réservoirs avant d'être transformée, le moment venu, en courant électrique.



Robert Bourassa

Production annuelle : 37 milliards de kWh



La Grande 1

Production annuelle : 7,5 milliards de kWh

Fig. I-4 : Schéma simplifié de la génération d'énergie à partir d'une centrale hydroélectrique.

Tableau I-1 : fiche technique des deux centrales hydrauliques.

	La Grande - 1	Robert Bourassa
Réservoir (superficie maximale du plan d'eau)	70 km ²	2 835 km ²
Barrages		
- Longueur en crête :		2,8 km
- Hauteur maximale :		162 m
Digues		
- Nombre :	2	29
- longueur totale en crête :	2,6 km	23,8 km
Évacuateurs de crues		
- nombre de vannes :	8	8
- capacité d'évacuation :	16 280 m ³ /s	16 280 m ³ /s
Groupes turbines-alternateurs		
- nombre :	12	16
- Puissance individuelle :	114 MW	333 MW
- Type de turbines :	à hélice à pales fixes	Francis
- Capacité de production annuelle :	7,5 milliards de kWh	37 milliards de kWh

2.3 L'eau : une source d'énergie renouvelable et propre

Après avoir traversé les turbines des barrages, les eaux rejoignent les rivières, puis les fleuves, pour enfin se jeter dans l'océan, le plus grand réservoir d'eau terrestre. Sous l'effet du soleil, l'eau des océans s'évapore, gonfle les nuages qui arroseront de pluie ou de neige les plaines et les montagnes. La boucle est alors bouclée. C'est le cycle de l'eau. Chaque année, les barrages profitent de cette énergie naturelle, gratuite et indéfiniment renouvelable. Comme les ancestrales roues à aubes tournant sous la simple action du courant, les turbines des centrales hydroélectriques sont animées par la force d'une eau passant d'un niveau élevé à un niveau inférieur. Dans ce processus, aucune fumée ne s'échappe et l'eau reste une source d'énergie essentiellement non-polluante. En effet, les conséquences de l'exploitation hydraulique (accumulation de sédiments ou de déchets flottants, variation rapide du débit des cours d'eau, différences de températures...) sont maintenant bien connues et maîtrisées.

2.4 Un coût d'exploitation modéré

En dépit d'un lourd investissement initial nécessaire à la construction des barrages, les aménagements hydrauliques restent à long terme des équipements très rentables. **Comparés aux centrales thermiques, ils produisent un kilowatt moins cher.** L'exploitation d'un "combustible" gratuit et renouvelable. De plus, les centrales hydrauliques exigent une maintenance réduite et ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

Economique et rapidement mobilisable, l'énergie d'origine hydraulique est avantageusement utilisée. Elle permet d'éviter la mise en route coûteuse de centrales thermiques supplémentaires et d'économiser de cette manière le combustible fossile ou nucléaire.

3- LES CENTRALES NUCLEAIRES

Une centrale nucléaire est une usine de production d'électricité. Elle transforme la chaleur libérée par la fission d'un matériau nucléaire, appelé "combustible" en énergie mécanique, puis électrique. **Le processus de production est commandé par un objectif unique : assurer le fonctionnement d'un alternateur, machine tournante conçue pour engendrer le courant électrique grâce à la rotation à grande vitesse d'un aimant placé à l'intérieur d'un bobinage métallique.**

3.1 Le combustible nucléaire

Le "combustible" utilisé dans les centrales nucléaires est l'uranium, un métal relativement abondant dans l'écorce terrestre. Parmi tous les corps élémentaires existant dans la nature, seul l'atome d'uranium 235 -un des trois types d'atomes constitutifs de l'élément uranium- possède une propriété spécifique : son noyau, lorsqu'il est percuté par un neutron, se brise en deux noyaux plus petits. On

dit que l'U 235 est fissile. Cette fission dégage de l'énergie, notamment sous forme de chaleur. En se brisant, l'atome libère deux ou trois neutrons qui iront à leur tour briser d'autres noyaux, et ainsi de suite... C'est ce que l'on appelle la réaction en chaîne. Une réaction engendrée artificiellement à l'intérieur des centrales nucléaires, qui est ensuite entretenue et contrôlée par des dispositifs appropriés. Elle fournit la chaleur nécessaire au fonctionnement de la centrale.

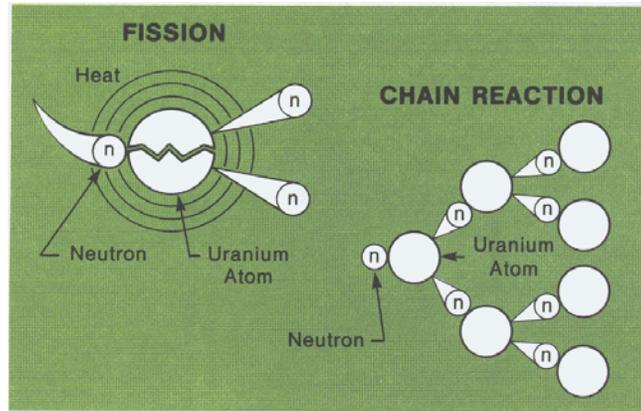


Fig. I-5 : Schéma simplifié de la fission nucléaire de l'uranium.

Le plutonium, qui se forme lors des phénomènes de fission de l'uranium, est lui aussi capable de fission. Il est utilisé comme combustible dans certaines centrales nucléaires.

3.2 Le processus de production d'électricité

Dans les centrales nucléaires qui relèvent de la filière dite "à eau sous pression"- la production d'électricité s'effectue selon le processus suivant décrit à la figure I-6.

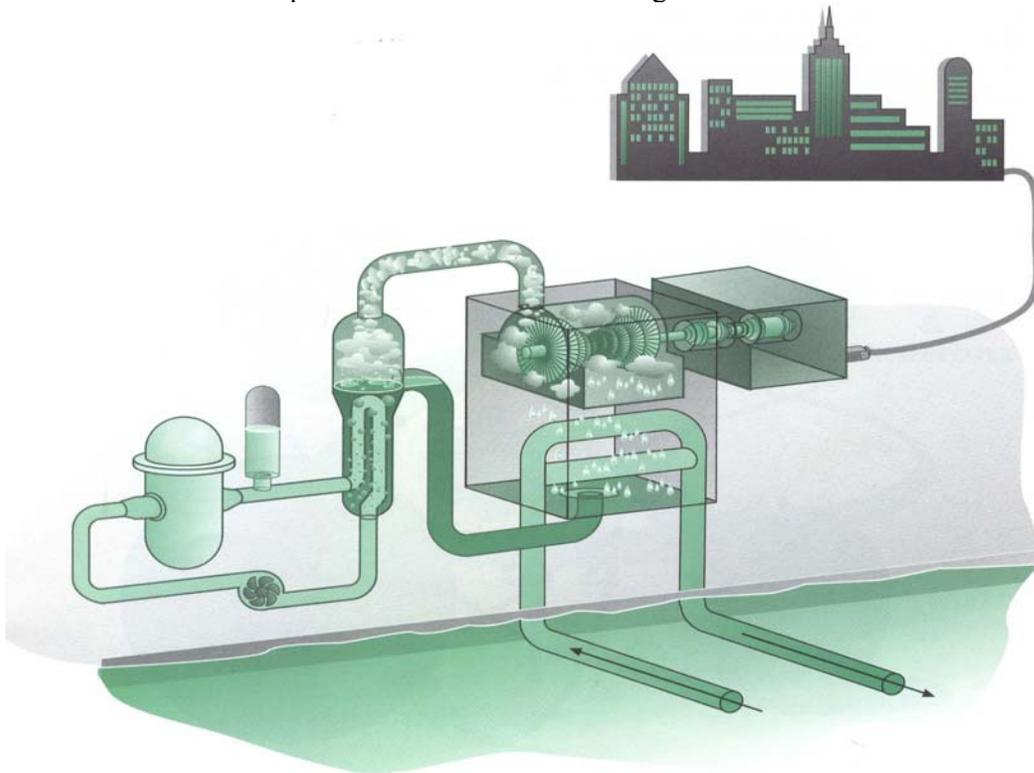


Fig. I-6 : Schéma simplifié de la génération d'énergie à partir d'une centrale nucléaire.

3.2.1 Le circuit primaire

L'uranium, légèrement "enrichi" dans sa variété -ou "isotope"- 235 est conditionné sous forme de petites pastilles. Celles-ci 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 (plus de 300°C). Elle est maintenue sous pression, ce qui empêche l'eau de bouillir, et circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire.

3.2.2 Le circuit secondaire

Par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur, le circuit primaire communique sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé, le circuit secondaire. Le générateur de vapeur est un assemblage de plusieurs milliers de tubes en forme de U à l'intérieur desquels pénètre l'eau chaude du circuit primaire. Ces tubes baignent dans l'eau du circuit secondaire qui bout à leur contact et se transforme en vapeur.

La pression de cette vapeur fait tourner la turbine à laquelle est couplé l'alternateur qui génère l'électricité. Au sortir de la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée dans le générateur de vapeur.

L'ensemble du circuit primaire, y compris les générateurs de vapeur (on en compte trois ou quatre reliés à la cuve) est enfermé dans une enceinte étanche en béton : le bâtiment réacteur. Ce cylindre mesure environ 50 mètres de diamètre et de plus de 75 mètres de hauteur avec son dôme. Le groupe turbine-alternateur, qui constitue la partie "classique" d'une centrale nucléaire est aménagé dans un bâtiment attenant appelé salle des machines.

3.2.3 Le circuit de refroidissement

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se retransformer en eau.

Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, 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 aéro-réfrigérants. L'eau échauffée 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.

3.3 Les rejets radioactifs

En fonctionnement normal, une centrale nucléaire émet des rejets radioactifs liquides ou gazeux. Il s'agit de rejets effectués volontairement. Ils proviennent des circuits d'épuration et de filtration de la centrale qui collectent une partie des éléments radioactifs engendrés par le fonctionnement des installations. Après avoir été triés, selon leur niveau de radioactivité et leur composition chimique, ces éléments sont stockés, traités puis rejetés sous forme liquide ou gazeuse. Les quantités d'effluents que les centrales sont autorisées à rejeter sont établies par les pouvoirs publics à des niveaux très bas écartant tout risque d'une augmentation significative de la radioactivité naturelle de l'environnement.

Dans la pratique, les rejets radioactifs effectués par les centrales nucléaires sont très inférieurs à ces normes réglementaires. Depuis l'origine du programme nucléaire, ils sont en décroissance continue et représentent moins de 2 % des quantités autorisées.

Se confondant avec ce "bruit de fond" fluctuant, le surcroît de 1% dû aux rejets radioactifs des centrales, n'entraîne pas de conséquence dommageable pour l'environnement ou pour la santé des populations.

3.4 Une énergie qui préserve la qualité de l'air

L'évaporation de l'eau dans les tours de réfrigération engendre un panache d'air humide dont l'ampleur dépend des conditions atmosphériques. Ce panache n'a pas d'effet sur le climat local. Il a pour seule conséquence une faible réduction de l'ensoleillement aux abords du site, inférieure aux fluctuations naturelles d'une année sur l'autre.

L'impact écologique d'une installation industrielle ne se mesure pas seulement aux nuisances qu'elle cause à l'environnement. Il se mesure aussi aux nuisances qu'elle permet d'éviter par rapport aux autres types d'installation assurant une production identique. Il faut donc mentionner la caractéristique écologique majeure des centrales nucléaires qui est de ne provoquer aucune pollution de l'atmosphère.

Contrairement aux centrales électriques à combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), les centrales nucléaires ne rejettent dans l'atmosphère aucun produit polluant. Ainsi, le remplacement d'une centrale à charbon de 1 000 MW par une centrale nucléaire de puissance équivalente permet d'éviter le rejet à l'atmosphère de 7 millions de tonnes de gaz carbonique et de 30 000 tonnes de soufre par an.

3.5 Contre l'effet de serre et les pluies acides

L'effet de serre, conduisant à un possible réchauffement de la planète et les pluies acides sont des menaces pour l'environnement. Certains produits polluants rejetés par les usines et les centrales électriques utilisant des combustibles fossiles contribuent à ces phénomènes (même si des programmes ont été lancés, ces dernières années, pour réduire le volume et la nocivité des effluents relâchés). Parce qu'elle est capable de fournir des quantités massives d'électricité sans polluer l'atmosphère, l'énergie nucléaire apparaît dans ces conditions comme un atout pour la préservation de l'environnement.

Comme toute activité humaine et industrielle, l'utilisation des matières nucléaires engendre des déchets. Les déchets radioactifs (ou déchets nucléaires) désignent toute matière dont on ne prévoit pas d'utilisation ultérieure et dont le niveau d'activité ne permet pas un rejet direct dans l'environnement.

D'une façon générale, en fonction de leur provenance, on distingue :

- les déchets de procédé, qui résultent des processus nucléaires liés au fonctionnement des installations (produits de fission de l'uranium, résines d'épuration, concentrats...);
- les déchets technologiques, liés aux travaux d'entretien et d'exploitation des installations (tenues de protection, surbottes, gants, outils ...).

3.6 Principes de gestion et classification

La classification des déchets radioactifs est fondée sur deux critères déterminants : leur niveau de radioactivité et leur durée de vie (la radioactivité diminue avec le temps : la grande majorité des déchets radioactifs présente, au bout de quelques dizaines d'années, un niveau de radioactivité jugé non dommageable pour la santé des populations et l'environnement). On aboutit ainsi à un classement des déchets en trois catégories (A, B, C) qui font chacune l'objet d'une politique de gestion particulière (voir le tableau général sur la gestion des déchets radioactifs).

3.6.1 Les déchets de type "A" sont de faible radioactivité, à vie courte.

Ils représentent 90 % de la totalité des déchets radioactifs (gants, surbottes, tenues de protection etc...). Ils sont compactés et conditionnés dans des fûts de métal ou de béton.

Les opérations de compactage et conditionnement s'effectuent jusqu'à présent sur les lieux mêmes de production. A l'avenir, elles sont appelées à s'effectuer dans un centre de traitement de grande capacité en cours de démarrage à Marcoule, où de nouveaux procédés d'incinération et de fusion permettront de réduire encore le volume final des déchets à stocker.

Le stockage est effectué dans des centres. Les fûts sont stockés en surface dans des cases étanches. La faible radioactivité de ces déchets décroît rapidement : en moyenne, elle diminue de moitié tous

les trente ans. Après une période de surveillance de 300 ans, au terme de laquelle la radioactivité des déchets se confondra avec la radioactivité naturelle, les sites de stockages seront considérés comme ayant achevé leur "mission".

3.6.2 Les déchets de type "B" sont de faible ou moyenne radioactivité, à vie longue

Ils représentent un peu plus de 9 % de la totalité des déchets radioactifs. Il s'agit de résines d'épuration, concentrats, filtres, coques métalliques ayant contenu l'uranium... Ces déchets sont traités en vue d'une réduction de leur volume, conditionnés dans des fûts de métal ou de béton et entreposés à La Hague. Une des options envisagées pour leur stockage final est de les enterrer en profondeur.

3.6.3 Les déchets de type "C" sont de forte radioactivité, à vie longue

Ils représentent environ 0,5 % de la totalité des déchets radioactifs. Il s'agit principalement des cendres de la combustion de l'uranium - ou produits de fission - engendrés par les réactions nucléaires dans le cœur des réacteurs et récupérés dans les combustibles usés grâce aux opérations de retraitement. La radioactivité de ces déchets reste élevée pendant une longue période, certains des éléments qu'ils contiennent ayant des durées de vie s'étendant sur des milliers d'années. C'est pourquoi des précautions particulières sont mises en oeuvre pour gérer ces déchets. Plusieurs étapes sont prévues : actuellement, les produits de fission sont stockés sous forme liquide pendant environ cinq ans dans des cuves en acier inoxydables où ils perdent une partie de leur chaleur et de leur radioactivité. Ils sont ensuite vitrifiés par incorporation à du verre en fusion, ce qui aboutit à l'obtention d'un matériau inerte capable de confiner la radioactivité. Le mélange vitrifié est coulé dans des conteneurs en acier. Ceux-ci sont placés dans des puits métalliques verticaux, eux-mêmes disposés dans des fosses bétonnées. La forte radioactivité des déchets vitrifiés dégage une chaleur importante. Les conteneurs doivent donc être refroidis pendant plusieurs années, par circulation d'air puis par convection naturelle. Au bout d'environ trente ans, ils pourront être récupérés en vue d'un stockage définitif.

Un tel stockage définitif ne présente pas de caractère d'urgence compte tenu du faible volume des déchets vitrifiés : environ 3000 m³ en l'an 2000, en volume total cumulé (soit l'équivalent d'une piscine olympique) pour l'ensemble des déchets de type "C" produits en France depuis le début du programme électronucléaire. Les études peuvent donc être poursuivies pour préparer le mieux possible les conditions de ce stockage. La France, comme la plupart des pays disposant d'une industrie nucléaire, envisage, pour les déchets radioactifs à vie longue, un stockage en sous-sol, à une profondeur comprise entre 400 et 1 000 mètres, dans une formation géologique favorable. Mais rien ne sera décidé dans l'immédiat. Une loi votée le 30 décembre 1991 par le Parlement français ouvre une période de 15 ans durant laquelle sera mené un important programme de recherche portant sur :

- la réduction de la radioactivité et de la durée de vie des déchets ;
- les procédés de conditionnement favorisant la réduction des volumes et l'amélioration du confinement ;
- l'étude d'un stockage en profondeur grâce à l'implantation de deux laboratoires souterrains expérimentaux.

Au terme de cette période d'étude, à partir de l'année 2006, les pouvoirs publics décideront de la solution la mieux adaptée pour le stockage des déchets radioactifs à vie longue.

3.7 Les effets de la radioactivité

Lorsque les rayonnements émis par une source radioactive viennent au contact de la matière, ils se "heurte" aux atomes présents et peuvent déplacer ou arracher certains de leurs électrons. Les atomes ayant perdu des électrons perdent du même coup leur neutralité électrique et se transforment en ions, c'est-à-dire en atomes chargés électriquement. Ce phénomène d'ionisation est le principal mécanisme par lequel la radioactivité agit sur la matière. D'où l'expression de "rayonnements ionisants" que l'on utilise pour qualifier les rayonnements dus à la radioactivité.

3.8 Les effets sur l'organisme humain

Les atomes ionisés peuvent être à l'origine de différents types de perturbations dans l'organisation et le fonctionnement des molécules dont ils sont les constituants. Les dommages causés aux molécules peuvent entraîner des lésions cellulaires et d'autres dysfonctionnements à l'intérieur de l'organisme.

L'organisme humain, qui est lui-même le siège d'une légère radioactivité, peut intégrer sans dommages certaines doses de radioactivité supplémentaires. Mais des doses excessives peuvent entraîner des détriments sanitaires plus ou moins graves, en fonction de plusieurs facteurs : la quantité de dose absorbée, le débit de dose absorbée (c'est-à-dire l'étalement de l'irradiation dans le temps), le type de rayonnement reçu, le volume des zones et la nature des organes irradiés.

3.9 Effet des rayonnements sur la santé des individus

(doses reçues en une seule fois et en un temps très court sur l'ensemble du corps)

600 à 800 mSv = fièvre, nausées passagères sans suite médicale sérieuse

1000 à 2000 mSv = troubles graves nécessitant un important traitement médical (modification de la formule sanguine, atteinte de la moelle osseuse...)

6000 mSv et au-delà = risque fatal.

(Utilisation médicale : de 1000 à 100 000 mSv et plus sur des zones très localisées pour détruire les tumeurs cancéreuses). En outre, des cancers ou autres maladies graves sont susceptibles de se développer chez certaines personnes parmi les irradiés. Ce risque dépend essentiellement de la quantité de rayonnement absorbée.

4- L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie du vent provient de celle du soleil qui chauffe inégalement les masses d'air, provoquant des différences de pression atmosphérique et des mouvements de circulation de l'air entre zones de températures différentes. Tout comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne est une énergie renouvelable, disponible partout (quoiqu'en quantités différentes) et bien sûr sans rejet polluant dans l'atmosphère.

De nos jours, l'énergie éolienne sert principalement à produire de l'électricité. Les moulins, désormais appelés éoliennes, sont tous systématiquement composés de trois éléments : les ailes (ou pales) tournent autour d'un axe, le rotor. Ce dernier transmet l'énergie mécanique de la rotation à un alternateur, qui transforme cette énergie en énergie électrique. Il existe cependant des types très variés d'éoliennes.

Pour les plus classiques, les pales sont identiques aux hélices d'un avion, à la différence qu'elles sont orientées pour recevoir et non pas pour créer un flux d'air. Le nombre de pales varie de une seule à une dizaine environ. Paradoxalement, plus leur nombre est élevé, plus l'hélice tourne lentement (mais avec une plus grande force). Or, pour produire de l'électricité, c'est la vitesse de rotation qui compte. La plupart des modèles actuels, possèdent ainsi deux ou trois pales. Il en existe même à une seule pale, équilibrée par un contrepoids. A la différence de ces modèles classiques, il existe des éoliennes dont les pales sont placées à l'horizontale et animent un axe de rotation vertical. Cette technique théoriquement avantageuse -ces éoliennes n'ont pas besoin d'être orientées face au vent pour fonctionner, elles tournent quelle que soit la direction du vent- n'a guère connu de développement pratique.

Les alternateurs actuels nécessitent une vitesse de rotation élevée pour fonctionner correctement. Les vitesses obtenues n'étant pas toujours suffisantes, on interpose un multiplicateur de vitesse entre le rotor et l'alternateur. Autre contrainte : la nécessité de maintenir une vitesse de rotation constante. Or, la vitesse du vent est par essence variable. On utilise donc des hélices dont l'orientation par rapport à l'axe de rotation peut varier de manière à ce qu'elles "prennent" plus ou moins le vent.



Dans le cas des petites applications séparées du réseau, une autre conséquence de cette versatilité du vent est qu'il faut des accumulateurs pour stocker l'énergie et pouvoir la consommer au moment souhaité. Dans le cas, plus général, d'une utilisation raccordée au réseau, il n'est plus nécessaire d'accumuler l'énergie. En contrepartie, pour pouvoir transporter le courant dans les lignes haute tension, il faut que l'éolienne fournisse une puissance élevée. Or, l'énergie produite croît avec la surface des pales... On augmente donc la taille des éoliennes. Certaines vont jusqu'à devenir gigantesques. Elle ne peut pourtant pas être augmentée indéfiniment. En effet, plus l'hélice est lourde, moins elle tourne vite. Heureusement, d'importants gains de poids ont été réalisés ces derniers temps grâce des techniques provenant du secteur spatial. Cette exigence de vitesse et de puissance pousse les ingénieurs à chercher les endroits les plus favorables aux installations. On parle même de gisement éolien. L'hélice est placée en hauteur, à quelques dizaines de mètres au dessus du sol pour les grosses machines actuelles, parce que la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Cela présente l'avantage supplémentaire d'affranchir l'éolienne des turbulences dues aux obstacles au niveau du sol. Mais cela pose également quelques problèmes d'esthétique en modifiant le paysage. Les grands systèmes sont également réputés bruyants, mais le bruit est en fait très modeste : quelques dizaines de décibels.

Tableau I-2 : Puissance ajoutée d'énergie éolienne dans certains pays, 2001.

Pays	Puissance ajoutée (MW)
Allemagne	2650
USA	1700
Espagne	1000
Italie	270
Grèce	83
Royaume-Uni	68
Canada	68
Suède	59

Tableau I-3 : Projection de Puissance d'énergie éolienne dans le monde.

Part de l'énergie qui proviendra de sources d'énergie verte en Europe d'ici 2010 :	22,0%
Part qui proviendrait de l'éolien au Québec , d'après une proposition récente d'Hydro-Québec :	~0,5%
Puissance mondiale d'énergie éolienne ajoutée en 2001 :	> 6 000 MW
Puissance mondiale d'énergie nucléaire ajoutée en 2001 :	< 1 750 MW
Puissance mondiale d'énergie éolienne en 1996 :	6200 MW
Puissance mondiale d'énergie éolienne en 2001 :	24000 MW
Puissance mondiale d'énergie éolienne en 2006 :	74 000 MW*

(*projection de BTM Consult)

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. Cette dépendance s'exprime par une relation empirique:

$$V_1/V_2 = (h_1/h_2)^n$$

où V_1 et V_2 sont les vitesses aux hauteurs respectives h_1 et h_2 . L'exposant n dépend de la configuration du terrain et varie entre 0,1 et 0,4 (pour terrain accidenté, n prend les valeurs de la limite supérieure).

La figure I.2 donne un exemple de répartition annuelle des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée. Comme la plupart des éoliennes démarrent à une vitesse de vent inférieure à 3 m/s, on remarque sur cette figure que l'exploitation de l'énergie éolienne est favorable pour le site, car les moyennes mensuelles du vent restent supérieures à 5 m/s.

Par ailleurs, la vitesse du vent est plus importante en hiver que pendant les mois d'été, ce qui constitue un facteur favorable, les besoins énergétiques étant plus importants pendant cette saison.

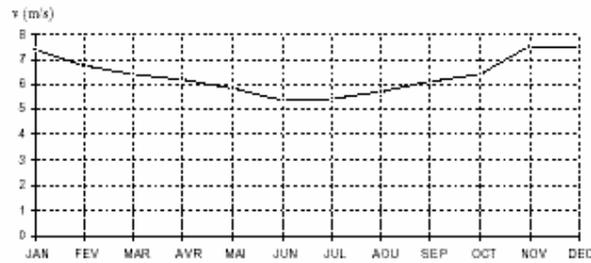


Figure I-7 : Moyennes mensuelles de la vitesse du vent.

La plus simple structure de conversion de l'énergie éolienne est présentée dans la figure I-8, où : T est la turbine, M, le multiplicateur de vitesse, GE, le générateur électrique et EP, le circuit électronique de puissance. On considère que le système alimente une charge électrique isolée.

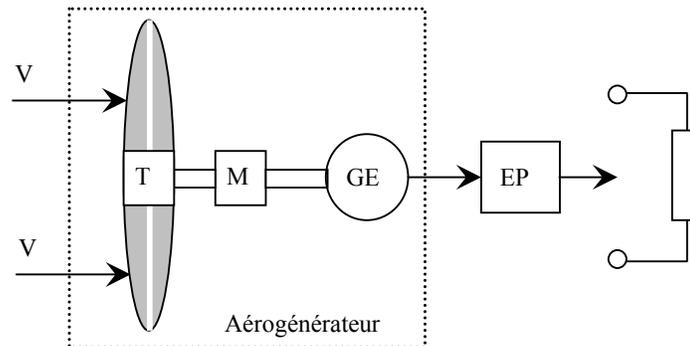


Figure I-8 : Structure de conversion de l'énergie éolienne.

Puissance individuelle d'une turbine : La puissance P extraite du vent est donnée par la formule approximative suivante : $P = 29,63 \times 10^{-2} D^2 u^3$ (en Watts) où D est le diamètre de la lame ou pôle (en mètre) et u la vitesse du vent en mètre/seconde.

La puissance mondiale d'énergie éolienne est maintenant estimée à plus de 24 000 MW. L'Europe compte maintenant environ 17 000 MW de puissance éolienne, produisant quelque 40 TWh d'électricité annuellement, l'équivalent de la consommation d'électricité de 10 millions de foyers européens. Produire une telle puissance par l'énergie éolienne, plutôt que par des centrales au charbon, engendre une réduction de 24 millions de tonnes d'émissions de CO_2 par année.

5- LES CENTRALES SOLAIRES

La principale source d'énergie dont dépend toute la terre est le Soleil. Sa puissance thermique émise sous forme de rayonnement est estimée à 390×10^{15} GW. La terre reçoit environ 180×10^6 GW dont un tiers est réfléchi directement par les couche supérieures de l'atmosphère et deux tiers parviennent à la surface du globe. Une partie infime, environ 1‰, est absorbée par photo-synthèse. Le reste est renvoyé dans l'univers, par réflexion et par rayonnement en produisant au passage les phénomènes météorologiques (vents, évaporation, précipitations). Les premières centrales ont été appelées thermo-hélioélectriques.

Le rayonnement solaire, qu'elles concentrent pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable, chauffe à son tour de l'eau qui alimente une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un générateur pour produire de l'électricité. Pour obtenir une chaleur suffisante, il faut concentrer le rayonnement.

C'est pourquoi on utilise des batteries de miroirs focalisant (appelés héliostats), orientables pour suivre la course du soleil. Ils concentrent les rayons solaires sur une chaudière, placée au sommet d'une tour. Cependant, il existe un grand nombre de difficultés techniques. La principale est celle des pertes de chaleur, au niveau du liquide de la chaudière et de toutes les étapes ultérieures jusqu'à la turbine. Plus le liquide de la chaudière est chaud, plus les pertes sont élevées, mais en deçà d'une certaine température, la chaudière n'est plus assez efficace. Le deuxième problème est qu'il n'est pas possible d'augmenter indéfiniment le nombre de miroirs, et donc l'énergie disponible pour la chaudière.



Figure I-9

En effet, si les héliostats sont trop éloignés, le rayonnement est plus difficilement focalisable et le moindre mouvement du miroir le dévie de sa cible. Ils n'apportent alors quasiment plus d'énergie à la chaudière et deviennent donc inutiles.

La *Nuon* et la *Siemens* ont développé et récemment branché le plus grand toit solaire du monde à un réseau électrique des Pays-Bas. Le système, d'une surface de 26 000 m², ou environ trois terrains de soccer, comprend 19 000 panneaux solaires qui offrent 2,3 MW de puissance et quelque 1,23 GWh d'électricité par année. Le projet a coûté plus de 17 millions d'euros (23,8M\$) en capital et a bénéficié d'une subvention du gouvernement néerlandais de 5,2 millions d'euros (7,3M\$).

5-1 La cellule photovoltaïque

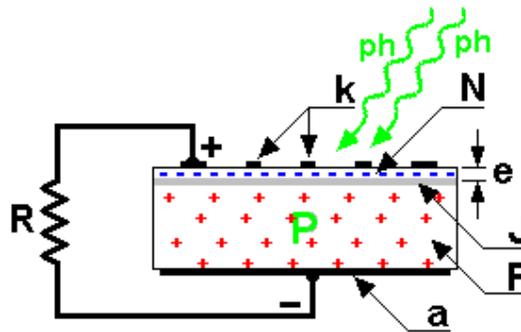


Figure I-10 : la cellule photovoltaïque, élément de base des panneaux solaires qui produisent de l'électricité.

Un cristal semi-conducteur dopé **P** est recouvert d'une zone très mince dopée **N** et d'épaisseur e égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction **J**.

La zone **N** est couverte par une grille métallique qui sert de cathode **k** tandis qu'une plaque métallique **a** recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. En général le semi-conducteur de base est du silicium monocristallin comme celui qui est utilisé pour la fabrication des transistors mais on rencontre maintenant plus fréquemment du silicium polycristallin moins coûteux à produire.

6- LA GEOTHERMIE

La température des roches de l'écorce terrestre augmente avec la profondeur de la Terre, très probablement à cause de la diffusion de chaleur issue des désintégrations radioactives ayant lieu au centre de la Terre. La chaleur croît avec la profondeur : en moyenne, 3°C tout les 100 mètres. Dans certaines régions du globe, la chaleur terrestre vient jusqu'à la surface sous forme de sources chaudes, eau ou vapeur d'eau.

L'eau chaude est exploitée directement sous forme de chaleur : chauffage central dans les habitations ou chauffage de serres comme en Islande où sont cultivés des fruits tropicaux. La vapeur d'eau extraite du sous-sol est utilisée dans la production d'électricité : comme dans une centrale thermique classique, elle actionne une turbine.

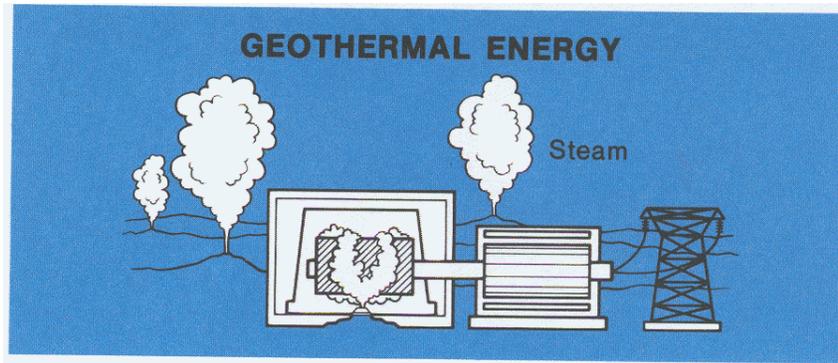


Fig. I-11 : Schéma simplifié de production d'électricité à partir d'une énergie géothermique.

Il est également possible d'utiliser les roches chaudes et sèches comme source d'énergie. Une circulation d'eau est entretenue entre deux puits forés dans le sol : l'eau versée dans l'un des puits se réchauffe au passage dans les roches sèches et ressort sous forme de vapeur.

Avec une vingtaine de sites exploités, les Etats-Unis se placent au premier rang mondial en terme de puissance électrique géothermique installée. D'une production de 2 817 MW, ils comptent augmenter passer à 3 400 MW d'ici l'an 2000. De nouvelles centrales sont en cours de construction, à Hawaï, dans le Nevada, ou encore en Alaska. Trois à quatre milles personnes travaillent déjà dans ce secteur. En deuxième position, arrivent les Philippines dont la puissance totale installée est de 1 227 MW (répartis sur cinq sites) pour un potentiel estimé de 3 à 4 000 MW. Neuf autres sites devraient rentrer en exploitation d'ici 1998. Des quantités de projets naissent dans le monde. Le Mexique compte atteindre 960 MW installés en l'an 2000. En Indonésie, la capacité totale pourrait atteindre 2 GW. Des études sont en cours au Chili (potentiel de 100 MW), au Guatemala (quatorze sites identifiés avec un potentiel d'au moins 94 MW), en Ethiopie (potentiel de 700 MW répartis en 24 sites), en Europe de l'Est (Slovénie, Croatie, Lituanie, Hongrie) mais aussi en Inde, au Canada,...

Tableau I-4 : Pays équipés de centrales géothermiques dans le monde.

Pays équipés de centrales géothermiques	Puissance installée en 1995 (MW)	Prévision pour l'an 2000 (MW)
Etats-Unis	2 817	3 400
Philippines	1 227	2 000
Mexique	743	
Italie	666	960
Japon	299	600
Nouvelle-Zélande	286	440
Indonésie	145	1 000
Salvador	100	115
Chine	32	210 à 295
Russie	11	100

7- LA BIOMASSE

A l'échelle mondiale, la majorité de la population utilise la biomasse comme source de combustible primaire : le bois, la paille ou d'autres végétaux secs sont brûlés pour assurer les besoins de chauffage ou de cuisson des aliments.

Au-delà de cette utilisation traditionnelle, la technique permet aujourd'hui de valoriser la biomasse "moderne" -déchets des industries du bois, de l'agro-industrie, déchets ménagers...- pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

Exemples de biomasse appliquée à la production d'énergie
<p>biomasse "traditionnelle" : Bois Déchets végétaux Déchets animaux</p> <p>biomasse "moderne" : Bois ronds de chauffe commercialisés et auto-consommés. Sciures, écorces, chutes, élagages... Déchets de l'agriculture et de l'agro-industrie Valorisation énergétiques de déchets ménagers, des déchets industriels de deuxième transformation et des déchets agroalimentaires</p>

Environ 60 % des déchets domestiques peuvent être réutilisés comme source d'énergie pour produire de l'électricité -via une centrale thermique- ou directement de la chaleur destinée au chauffage urbain, voire simultanément les deux dans le cas d'installations de co-génération. La valorisation des déchets urbains est un des axes de développement, qu'il s'agisse de produire de l'électricité, de la chaleur ou du méthane.

Outre la production de chaleur ou d'électricité, les déchets ménagers peuvent aussi alimenter des bio-réacteurs qui recyclent les ordures et produisent des gaz (comme le méthane) et autres matières énergétiques utilisées par les industries. Par ailleurs, il est possible d'extraire le méthane des déchets animaux et humains à l'aide de cuves à biogaz utilisant des bactéries qui décomposent les matières organiques.

8- COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Comme l'illustre la Figure I-12, l'électrification des sociétés s'est réalisée, historiquement, sur deux voies parallèles : celle de l'énergie thermique classique et celle de l'hydroélectricité.

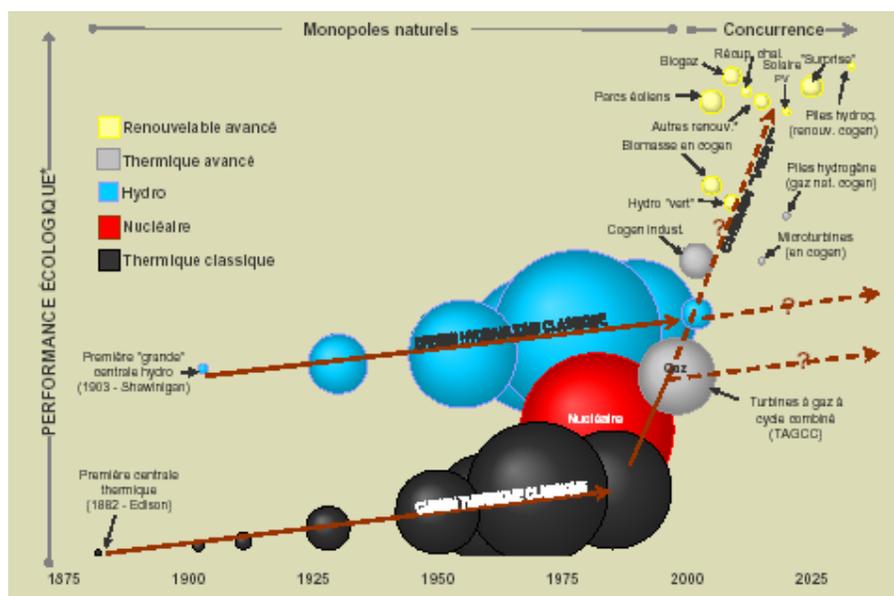


Figure I-12 : L'écologisation de la production d'électricité.

* Notes explicatives :

► La superficie des bulles indique la taille relative des technologies dominantes. Afin d'assurer leur visibilité, nous avons gonflé les bulles « solaire-PV », « microturbines » et « piles à hydrogène ».

► **La bulle « biogaz »** réfère à la réutilisation de l'énergie (e.g. méthane) provenant notamment de rejets agricoles et municipaux. **La bulle « Autres renouv. »** réfère à la production d'énergie à partir de sources naturelles telles que la chaleur terrestre, les vagues et les marées.

La bulle « Surprise » réfère aux nouvelles technologies et innovations qui pourront être développées à l'avenir (par exemple, la fusion nucléaire, le thermo-photovoltaïque, etc.).

► **L'échelle écologique** est une approximation. Les centrales thermiques (classiques et avancées) sont classées principalement selon leur efficacité de combustion (nette), ajustée pour d'autres facteurs de performance écologique. Le classement des centrales nucléaires, dont les impacts environnementaux sont incomparables à ceux des centrales thermiques, est un jugement subjectif de l'auteur. Il en va de même pour les centrales hydroélectriques, dont les impacts sont en plus largement dépendants du site.

Dans les deux cas, le premier siècle de développement a permis des gains environnementaux progressifs mais modérés, accompagnés du même coup de la croissance plus ou moins progressive de la taille des centrales.

► En ce qui concerne les centrales thermiques classiques, elles sont devenues à la fois moins polluantes grâce à des technologies de contrôle à la cheminée et, surtout, plus performantes en termes d'efficacité de la combustion.

► En ce qui concerne les projets hydroélectriques, il est sensiblement plus difficile de généraliser, compte tenu de la spécificité de chaque projet. Néanmoins, les efforts de protection des poissons et des habitats, notamment, ont certainement connu des progrès au cours des dernières décennies.

Dans les deux cas – thermique classique et hydraulique – les résultats demeurent toutefois décevants dans une perspective écologique (quoiqu'à des degrés différents), comme en témoigne l'opposition systématique des écologistes aux nouveaux projets de même nature.

Or, depuis le début des années 1990, une deuxième phase de progrès – sensiblement plus rapide que la précédente – se pointe à l'horizon, et semble lier deux phénomènes : la chute des économies d'échelle et l'avènement de technologies véritablement « vertes ».

Cette « voie verte » de l'électrification est le résultat – en plus des phénomènes technologiques et économiques discutés précédemment – d'une conscientisation environnementale grandissante survenue depuis les années 1960 et qui se concrétise aujourd'hui par l'entrée en force prochaine du Protocole de Kyoto – préoccupé par l'équilibre climatique mondial – consacrer son ascension, en l'espace de quarante ans, comme une force internationale de taille.

Ce graphique illustre le degré de changement en cours dans les pays de l'Occident. Pendant près d'un siècle, deux chemins parallèles – thermique et hydraulique – ont graduellement amélioré leur performance environnementale (axe vertical), en même temps que les centrales gagnaient progressivement – puis soudainement – en taille (superficie des bulles). Il aura fallu la fin de la course aux économies d'échelle et l'avènement de la concurrence pour qu'une explosion de technologies diverses présente l'espoir d'un verdissement réel.

Sur le plan environnemental, les acteurs qui dominent les marchés énergétiques actuels (en particulier ceux dont le produit est intensif en carbone) pourraient parvenir à diminuer ou à reporter le renforcement des exigences environnementales et notamment celles visant les émissions de gaz à effet de serre (GES). À brève échéance, la plus grande préoccupation concerne la ratification, la mise en vigueur et le respect des cibles de la première période de réductions (2008-2012) prévues au Protocole de Kyoto. À moyen terme, on pense aux négociations à venir qui détermineront les cibles de la deuxième période de réductions (post-2012) du protocole.

Depuis une décennie, les taux de croissance des technologies énergétiques vertes dominent largement ceux des énergies conventionnelles (Figure I-13). En 2001, trois fois plus de puissance éolienne furent installées à travers le monde que de puissance nucléaire.

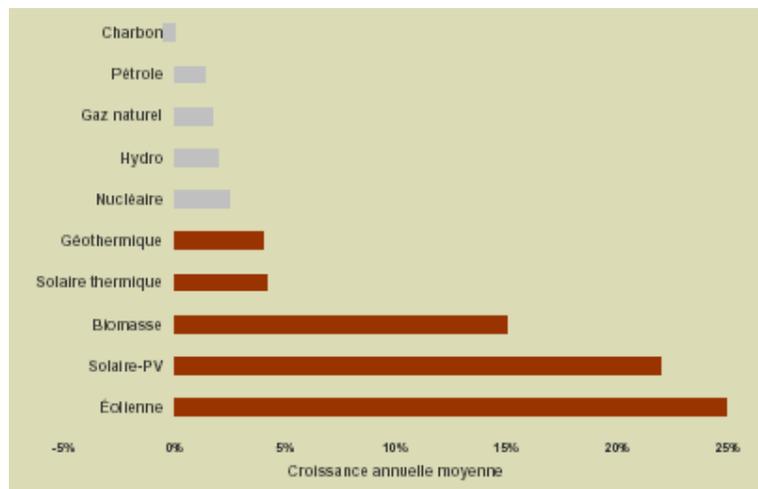


Figure I-13 : Croissance des ventes mondiales 1990-2000. Source : Shell (2001)

9- BIBLIOGRAPHIES

Centre Hélios, *Enjeux – Énergies*, Vol. 1, N° 1 - 2 avril 2002.

Philippe U. Dunsky – *Quel avenir énergétique?* Cahiers de l'énergie – série d'analyses publiées par le Centre Hélios, Vol. 1, no 1 – 17 décembre 2002.

Westinghouse Electric Company, *Questions Kids ask about energy*.

Westinghouse Electric Company, *Electricity from nuclear energy*.

<http://www.edf.fr>