

Chapitre 2

Production de l'énergie électrique

1. Introduction :

La production d'électricité est un secteur industriel vital, offrant à des clients, particuliers ou organisations, le service d'un approvisionnement régulier en énergie électrique.

La production d'électricité se fait depuis la fin du XIXe siècle à partir de différentes sources d'énergie potentielles. Les premières centrales électriques fonctionnaient au bois. Aujourd'hui, la production se fait à partir du pétrole, du gaz naturel, du charbon, de l'énergie nucléaire, de l'énergie hydraulique, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne.

Les besoins en électricité des pays ne cessent d'augmenter. Le producteur d'électricité doit pouvoir satisfaire les demandes de sa clientèle, à toute heure, au prix du Kilowatt – heure le plus bas.

L'énergie électrique est produite dans des centrales que l'on peut classer comme suite :

- Centrales hydrauliques ;
- Centrales thermiques classiques qui utilisent comme combustible le charbon, le fuel ou le gaz ;
- Centrales nucléaires ;
- Fermes éoliennes ;
- Centrale solaire.

2. Centrale Hydraulique :

2.1. Eléments principaux d'une centrale hydraulique :

L'énergie électrique produite par des centrales hydrauliques est particulièrement précieuse car elle est **gratuite**, elle est **renouvelable** et elle fait fonctionner les turbines avec un rendement **voisin de l'unité**.

Les aménagements hydro-électriques sont de types variés car leur conception dépend de nombreux facteurs (géologiques, topologiques, hydrologiques...) qui sont variables d'un site à l'autre. Les paramètres qui conditionnent le choix d'un site sont essentiellement :

- Débit d'eau utilisable ;
- Hauteur de chute d'eau : basse chute $h \leq 40 \text{ m}$, moyenne chute $40 < h \leq 200 \text{ m}$ et haute chute $h > 200 \text{ m}$;
- Possibilité de stockage de l'eau.

Un aménagement hydraulique comporte les éléments principaux suivants :

- Un barrage qui peut être :
 - o de **type poids**, voir Fig.1 : avec cette construction, c'est la masse importante du barrage qui empêche les pressions de l'eau de le renverser ;

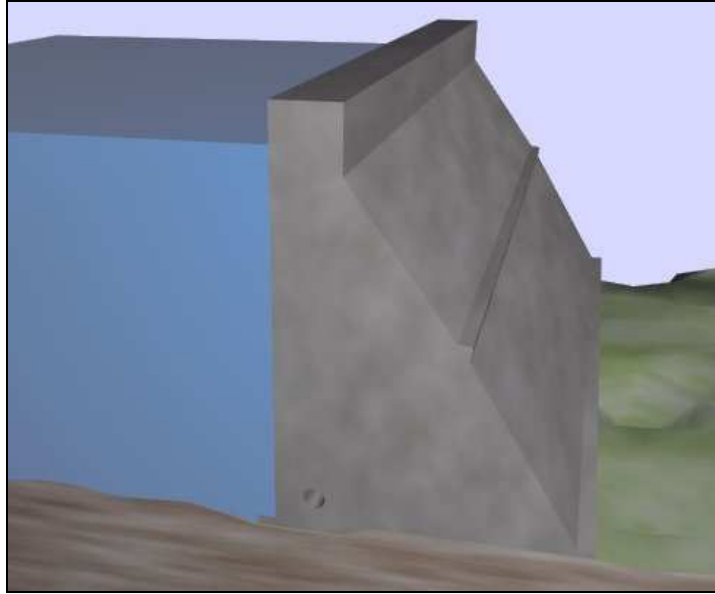


Fig. 1. Barrage du type Poids.

- o de **type voûte**, voir Fig.2 : avec cette structure, la poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure). La technique de barrage-voûte nécessite une vallée plutôt étroite et un bon rocher de fondation. Même lorsque ces conditions sont réunies, le barrage-voûte est aujourd'hui souvent concurrencé par les barrages-poids en béton, car la mise en œuvre peut être d'avantage mécanisée. Certains barrages sont à voûtes multiples, ils comportent ainsi plusieurs voûtes successives qui prennent appui sur des contreforts massifs.

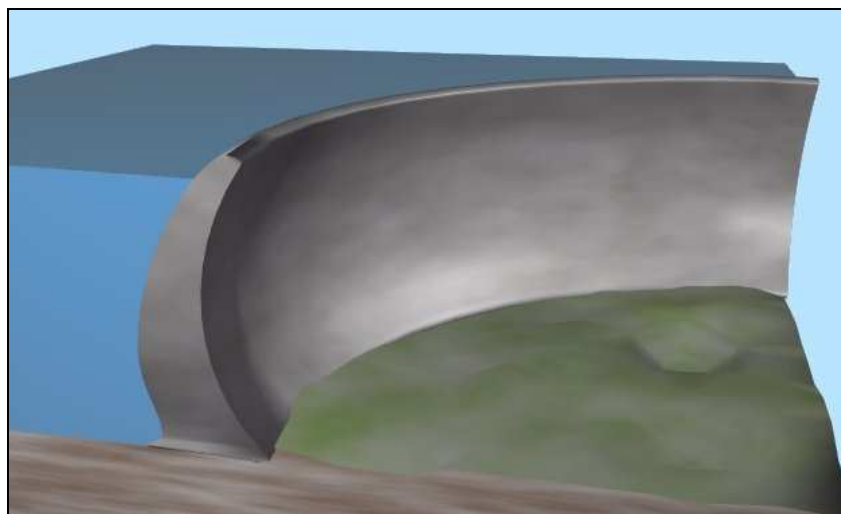


Fig. 2. Barrage du type Voûte.

- Des **ouvrages d'amenée et de fuite** : ils comportent une prise d'eau relié à un canal d'amenée qui a pour but de conduire l'eau en un lieu favorable à l'établissement de la chute. Ensuite une conduite forcée fait parcourir à l'eau la totalité de la chute tandis qu'une cheminée d'équilibre, placée à la jonction de la galerie et de la conduite forcée, est destinée à atténuer les **coups de bélier** (c'est-à-dire les variations de pressions qui se produisent quand on ferme l'arrivée d'eau à la turbine).

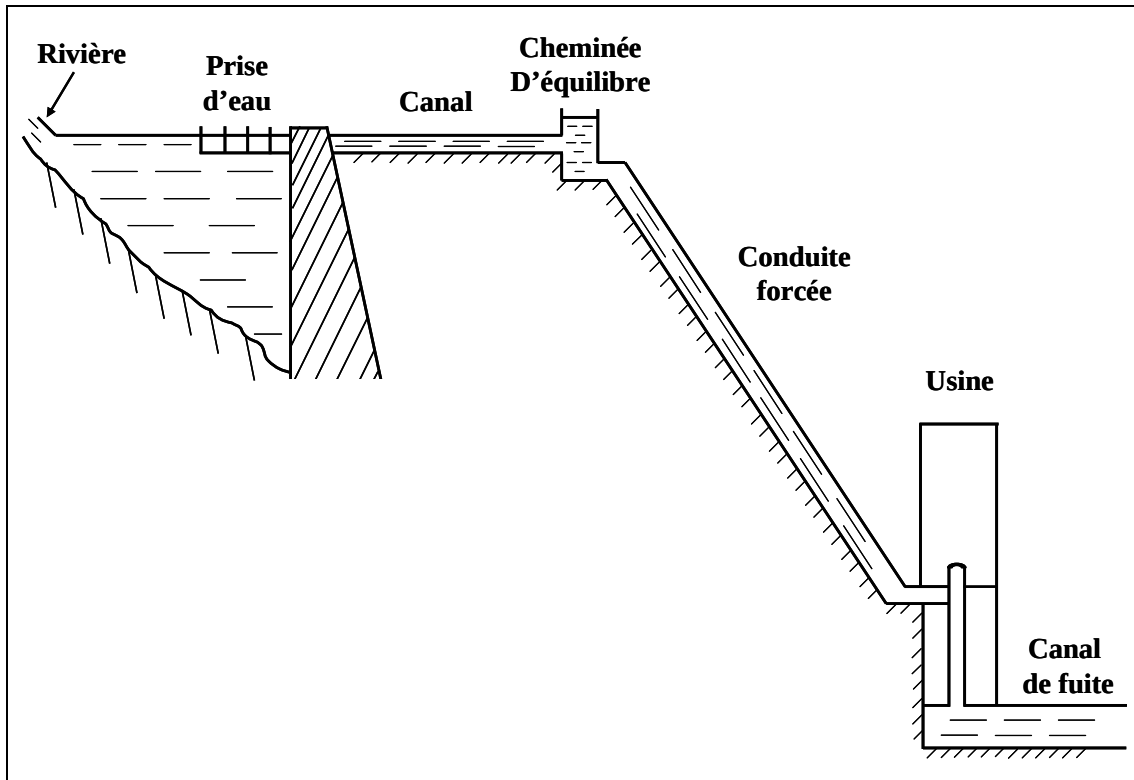


Fig. 3. Amenée et fuite d'eau d'un barrage.

- La **turbine** : c'est l'organe qui transforme l'énergie potentielle et l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique. La roue en est la partie mobile entraînant l'arbre de rotation qui transmet l'énergie mécanique au générateur. La puissance mécanique transmise est égale à :

$$W_t = 9,81 \, v_t \, Q \, h_n$$

Avec :

W_t : la puissance (kW),

v_t : le rendement de la turbine,

Q : le débit (m³/s),

h_n : la hauteur de chute nette à l'entrée de la turbine (m).

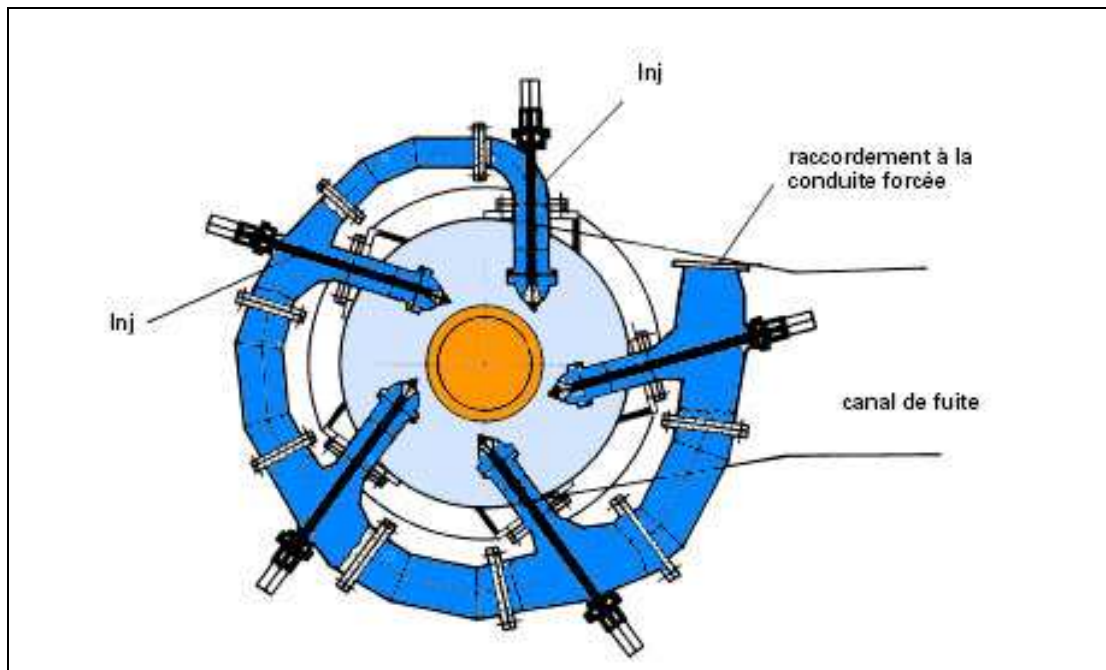
La variation de cette puissance est obtenue par variation du débit de l'eau. Suivant la hauteur de la chute d'eau, différents types de turbines sont utilisés :

- o **Turbine Pelton** : pour un débit faible et une grande hauteur de chute. La turbine Pelton est caractérisée par ces augets en forme de cuillères coupées en

deux, voir Fig. 4.a. Cette turbine peut avoir un grand diamètre et plusieurs injecteurs (c'est la partie qui permet de former un jet d'eau de diamètre voulu pour bien frapper la roue avec toute la force de l'eau ; grâce à eux on peut régler le débit de l'eau à appliquer sur la roue, voir Fig. 4.b).



b. Turbine



b. Injecteurs.

Fig. 4. Turbine Pelton.

- o **Turbine Francis** : pour les moyennes chutes, voir Fig. 5. C'est une turbine à réaction c'est-à-dire que la force de l'eau après la turbine "tire" celle-ci à tourner. Elle se compose d'un distributeur, fixe ou mobile, et d'une partie tournante. La turbine Francis est très répandue grâce à son rendement.

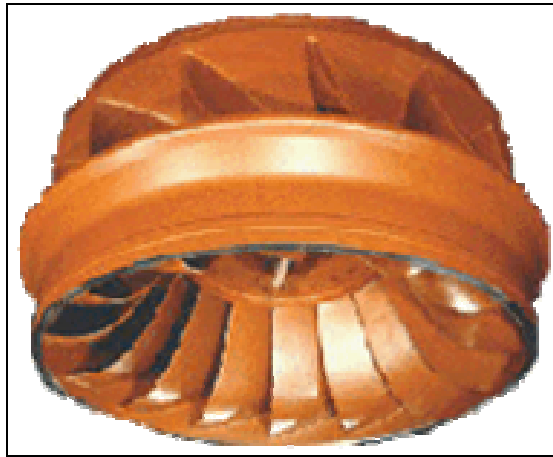


Fig. 5. Turbine Francis.

- o **Turbine Kaplan (à hélices)** : pour gros débit, très gros débit pouvant aller jusqu'à des milliers de m³/s mais par contre pour des chutes de quelques mètres seulement, Fig. 6.

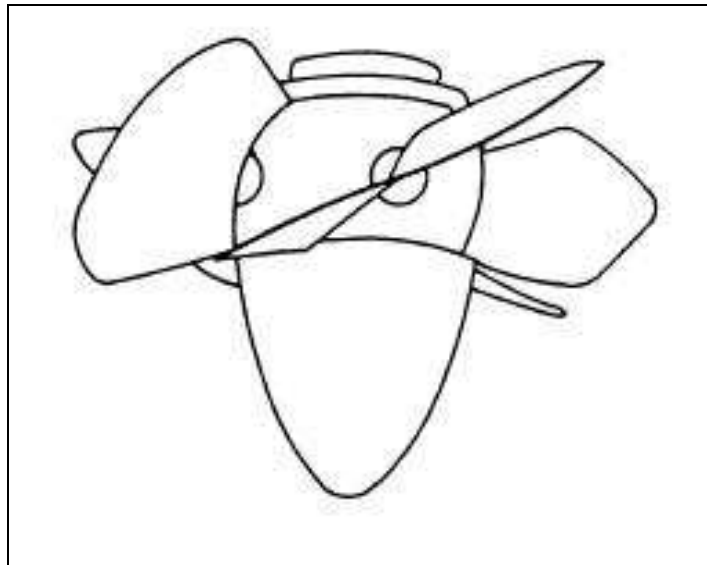


Fig. 6. Turbine Kaplan (à Hélices).

- **Matériels électriques** : l'énergie mécanique de la turbine transmise par l'arbre est transformée en énergie électrique par un **alternateur** fournissant un courant électrique alternatif triphasé à 50 Hz (ou 60 Hz dans certains réseaux américains).

Le **régulateur de tension** règle la tension avant couplage et la fourniture de réactif après couplage et il participe à la tenue de la tension du réseau.

Les **transformateurs** élèvent les tensions des alternateurs (3,5 à 18 kV) à la tension du réseau (60 à 400 kV).

Le schéma électrique de puissance est simple. Entre les générateurs, les transformateurs de puissance et d'alimentation des auxiliaires et le point de livraison au réseau, les organes de coupure sont reliés par des jeux de barres aériens ou sous gaine.

- **Services Auxiliaires** : ils sont composés de matériels permettant de faire fonctionner la centrale et les groupes. Ils sont alimentés à partir du réseau de distribution ou à partir des jeux de barres de départ avec un secours par un groupe électrogène (Diesel) ou hydraulique auxiliaire capable de démarrer sur batterie.

Les matériels les plus importants pour la sécurité sont les batteries, les pompes à huile de régulation, de graissage, les pompes à eau d'exhaure, de réfrigération.

Les matériels de manutention principaux (ponts roulants) sont dimensionnés pour démonter un alternateur, la masse la plus importante est en général celle du rotor.

2.2. Différents types de centrales hydrauliques :

Les centrales hydrauliques peuvent être classées, selon leurs possibilités de stockage et d'utilisation d'eau, dans les catégories suivantes :

- **Centrale de lac** : elles comportent un réservoir dont le temps de remplissage (égal ou supérieur à 400 heures) permet de stocker les apports en période de hautes eaux pour les libérer en période de pointes de consommation. En moyenne altitude, les réservoirs sont principalement alimentés par les eaux de pluie, leur fonctionnement peut être donc irrégulier d'une année à l'autre. En haute altitude, le remplissage s'effectue principalement en printemps avec la fonte des neiges, et en été avec la fonte des glaciers, leur fonctionnement est donc plus régulier.
- **Centrales d'écluse** : elles comportent un réservoir dont la durée de remplissage, avec un débit moyen du cours d'eau qui l'alimente, est comprise entre 2 et 400 heures. Ces barrages peuvent fonctionner en stockant de l'eau durant les heures creuses de la consommation électrique et produisent de l'énergie électrique durant les heures de fortes charges.
- **Centrales au fil de l'eau** : elles sont caractérisées par l'absence totale de réserve d'eau. L'arrêt d'une turbine constitue une perte d'énergie car on doit laisser l'eau s'écouler sans la faire travailler, elles doivent donc fonctionner en permanence.
- **Centrales de pompage** : ces centrales permettent le report d'énergie d'une période sur une autre et ce en réalisant un échange entre deux bassins situés à deux altitudes différentes. L'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur durant les heures creuses et elle est libérée du bassin supérieur vers le bassin inférieur pendant les heures de charge.

3. Centrale Thermique :

3.1. Centrale à vapeur :

Avec ce type de centrale, la vapeur est utilisée pour faire tourner le moteur primaire du générateur électrique (turbine). Dans ce processus, l'énergie thermique est convertie en

énergie mécanique et par la suite en énergie électrique via un système turbine – génératrice. L'énergie thermique est obtenue par combustion de fuel conventionnel (charbon, gaz, pétrole...). L'eau est utilisée pour générer de la vapeur dans la chaudière en brûlant du combustible. Les circuits primaires de circulation de vapeur de ce type de centrales peuvent fonctionner avec ou sans circuit de condensation. Dans les centrales non équipées de condensateur, la vapeur utilisée, dans le circuit primaire, est à une pression supérieure ou égale à la pression atmosphérique. Cependant, dans les centrales équipées de condensateur (les plus utilisées de nos jours), la vapeur, arrivant dans le condensateur, est à pression inférieure à la pression atmosphérique et cette vapeur est transformée en eau.

3.1.1. Fonctionnement et différentes unités d'une centrale à vapeur :

Le schéma d'une centrale à charbon typique est donné sur la Fig. 7. Cette centrale peut être divisée en petites unités suivantes :

- Unité de fuel ;
- Unité de traitement des cendres ;
- Chaudière ;
- Unité d'alimentation en eau ;
- Unité de refroidissement d'eau ;
- Turbine ;
- Génératrice.

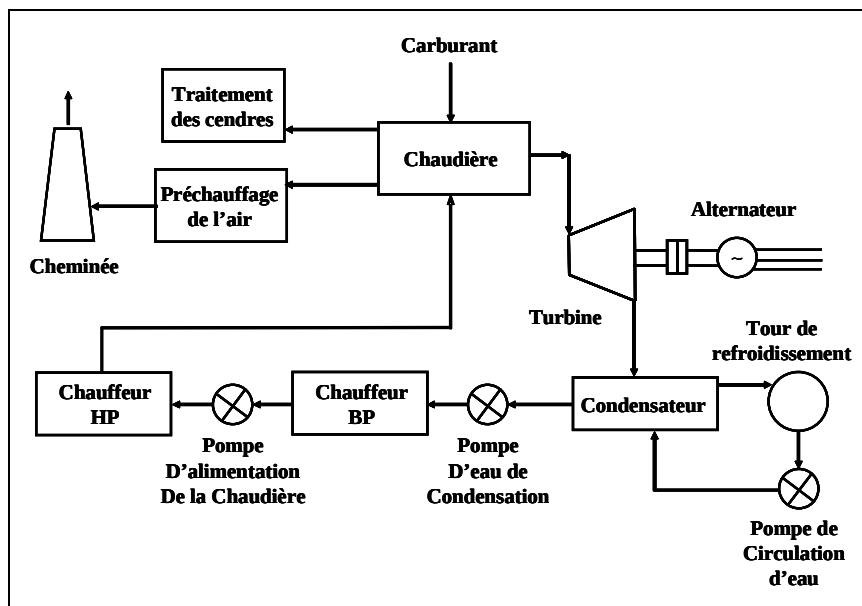


Fig. 7. Centrale électrique typique à vapeur.

3.1.1.1. Circuits principaux de fluide :

3.1.1.1.1. Circuit du combustible et de la cendre :

Le combustible est stocké et alimente la chaudière via un tapis roulant (charbon). Afin d'extraire le maximum de chaleur du charbon, ce dernier doit être traité afin de lui donner une taille bien définie ; de plus pour brûler ce charbon, il est nécessaire d'utiliser un fuel liquide

qui est également utilisé pour une bonne diffusion du combustible dans la chaudière. Les cendres issues de la combustion sont acheminées au circuit de traitement des cendres.

3.1.1.1.2. Circuit d'air et de gaz :

L'air, nécessaire pour la combustion du fuel, alimente la chaudière ; il est préchauffé en utilisant l'énergie des gaz chauds sortant de la chaudière après combustion du charbon (fuel). Ce préchauffage aide dans la combustion du charbon.

3.1.1.1.3. Circuit d'alimentation en eau et en vapeur :

Dans les centrales à vapeur de type condensation (équipées de circuits de condensation), la vapeur est transformée en eau par ce circuit. Pour la sécurité de la turbine (maintient en bon état), l'eau utilisée est déminéralisée. Une pompe d'alimentation de la chaudière achemine l'eau dans la chaudière où elle est transformée en vapeur. Cette dernière est surchauffée avant d'être envoyée à la turbine pour la faire tourner. En fonction de la taille de la centrale (puissance), on peut trouver différents étages de la turbine : Haute Pression (HP), Moyenne Pression (MP) et Basse Pression (BP). La vapeur, après être passée dans la partie HP de la turbine, est renvoyée à la chaudière pour augmenter sa température et sa pression et ensuite injectée dans la partie MP de la turbine. Le dernier mouvement est donné en faisant passer la vapeur de la sortie de la partie MP vers la BP de la turbine. A la sortie de cette dernière, la vapeur passe par un condenseur et le cycle recommence en réinjectant l'eau condensée dans la chaudière via la pompe d'alimentation (moteur à induction à grande capacité).

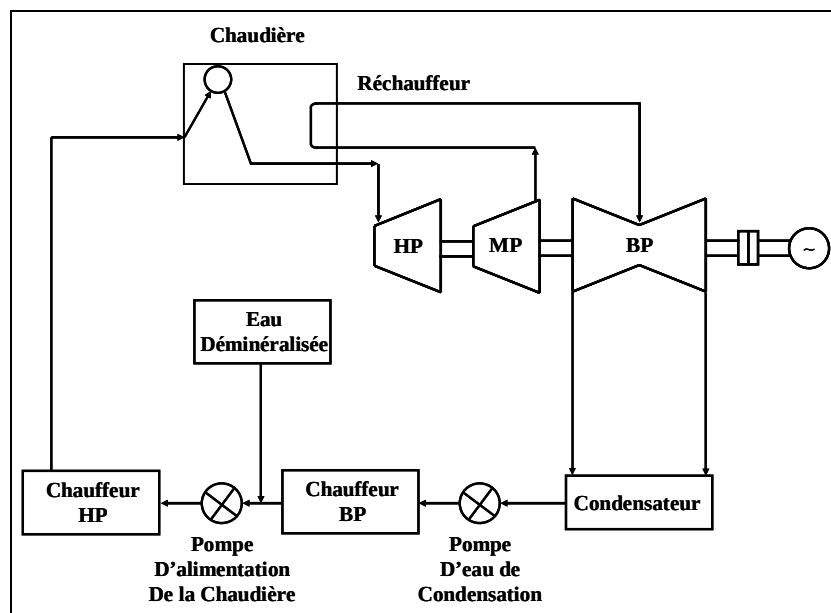


Fig. 8. Alimentation en eau et circuit d'écoulement de la vapeur.

3.1.1.1.4. Circuit de refroidissement :

Pour la condensation de la vapeur dans le circuit utilisé à cet effet et pour y maintenir une faible pression, une grande quantité d'eau de refroidissement est nécessaire ; cette eau peut

venir d'une rivière ou la mer et sera restituée après utilisation. Quand il n'y a pas suffisamment d'eau, des tours ou bassins de refroidissement sont utilisés.

3.1.2. Description des principaux équipements d'une centrale à vapeur :

3.1.2.1. Chaudière :

C'est le plus grand bâtiment de la centrale après la cheminée. Elle est utilisée pour générer de la vapeur et sa surchauffe. Les chaudières à vapeur sont de deux types :

- **Chaudière à tubes d'eau** : avec cette chaudière, l'eau circule dans des tuyaux et les flammes sont à l'extérieur de ces tuyaux. C'est la chaudière la plus utilisée dans les centrales électriques.
- **Chaudière Multitubulaire de chauffe** : avec cette chaudière, les flammes sont dans des tuyaux et l'eau est toute autour de ces tuyaux. Ce type de chaudière est la moins cher mais c'est celle qui est plus susceptible d'exploser. En outre, le volume d'eau est plus important, par conséquent le contrôle rapide de la production de la vapeur est plus difficile.

3.1.2.2. Turbines :

La turbine, utilisée pour faire tourner l'alternateur synchrone, est un équipement qui transforme l'énergie de la vapeur en une énergie cinétique de rotation. Les turbines peuvent être classées en fonction de la direction d'écoulement de la vapeur, nombre d'étages, vitesse...

L'énergie potentielle de la vapeur due à la pression et à l'énergie interne, est transformée en une énergie cinétique quand elle passe par les ailettes. Dans les turbines à vapeur, la vapeur se détend dans les gicleurs fixes et atteint une grande vitesse. La pression de la vapeur est graduellement réduite dans les ailettes quand celles-ci sont traversées par la vapeur. Le rendement de la centrale dépend de celui des turbines. Afin d'augmenter la puissance de sortie de l'arbre, la turbine est équipée de plusieurs étages : HP, MP et BP.

3.1.2.3. Alternateur :

Dans une centrale électrique à vapeur, plusieurs unités de génération sont utilisées afin d'augmenter la capacité totale de la centrale. Pour la génération électrique, une génératrice synchrone à haute vitesse est utilisée car le rendement des turbines à vapeur est élevé aux grandes vitesses ; pour des alternateurs à une paire de pôles, la vitesse de rotation de l'alternateur est de 3000 tr/min.

L'alternateur est commandé en puissance et en tension. Ce contrôle peut être réalisé par une de ces deux commandes :

- **Commande en puissance active et en fréquence** : elle est obtenue en agissant sur les entrées de la turbine (vapeur, eau...) ;

- **Commande en puissance réactive et en tension** : elle est obtenue en agissant sur l'excitation de la génératrice asynchrone.

De nos jours l'excitation se fait au moyen d'une alimentation alternative (arrivant du générateur lui-même) et au moyen d'un redresseur. Ce dernier peut être fixe (utilisation de ballasts) ou rotatif.

L'alternateur doit être protégé contre :

- **Défaut externe de phase** : utilisé des relais de courant avec un temps inverse ;
- **Défaut entre phases** : utilisé les protections différentielles ;
- **Défaut entre phase et terre** : utilisé des relais de défauts à la terre ;
- **Défaut d'enroulement** : utilisé des protections différentielles ;
- **Surchauffe** : des relais thermiques.

3.2. Centrale à gaz :

La technologie des turbines à gaz est la plus efficace pour la conversion des carburant fossile en énergie électrique et ceux grâce aux nombreuses recherches menés dans ce domaine.

3.2.1. Centrale électrique simple équipée de turbines à gaz :

3.2.1.1.Principe de fonctionnement :

Une telle centrale consiste en une chambre à combustion, un compresseur à air, une turbine et différentes auxiliaires pour lubrification, contrôle de la vitesse, alimentation en carburant et allumage.

Le fonctionnement de la turbine à gaz commence par l'arrivée de l'air atmosphérique au compresseur qui, à sa sortie, sa pression et sa température se voit augmenter. Cet air sous pression entre dans la chambre de combustion où le carburant brûle et fait augmenter la température de l'air sous pression. Le mélange de l'air chaud et sous pression ainsi que les produits de la combustion (mélange de gaz), vapeur d'air, s'étend à travers les gicleurs et leur vitesse augmente. Une énergie cinétique de la vapeur d'air est donc transmise aux ailettes de la turbine dont une partie est utilisée pour le compresseur (faire tourner son arbre) et le reste pour le travail de l'arbre du turbo – alternateur. La pression de la vapeur d'air diminue durant son trajet dans la turbine et elle finit par s'échapper à la pression atmosphérique. Ce principe de fonctionnement est illustré sur la Fig.9.

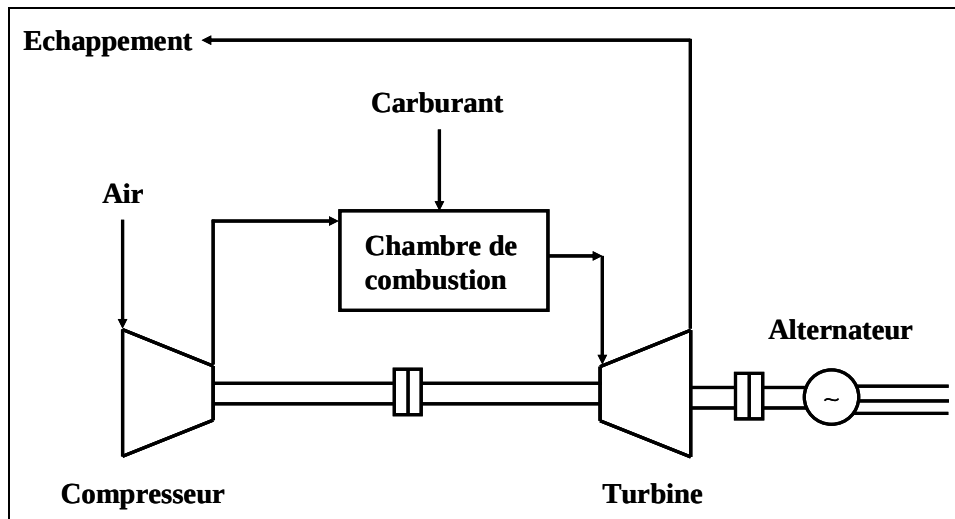


Fig. 9. Centrale électrique simple équipée d'une Turbine à gaz.

Il existe plusieurs limites pratiques des centrales à turbines à gaz telles que la température et la vitesse des ailettes, rendement du compresseur et de la turbine, ainsi que le transfert de chaleur.

Les centrales équipées de turbine à gaz présentent l'avantage d'être simples, occupant peu d'espace et nécessitant peu d'eau de refroidissement.

3.2.1.2. Amélioration des centrales électrique simple équipée de turbine à gaz :

Afin d'améliorer les performances d'une centrale électrique équipée d'une turbine à gaz, il est possible d'ajouter un ou la combinaison des systèmes suivants :

- **Régénération** : ça consiste à récupérer une partie de la chaleur des gaz d'échappement, voir fig. 10, c'est l'équivalent d'un pré – chauffeur dans les centrales électriques à vapeur. L'inconvénient avec ce système c'est la nécessité d'une grande zone de tubes de surface, de les maintenir propres et d'augmenter la résistance d'écoulement.

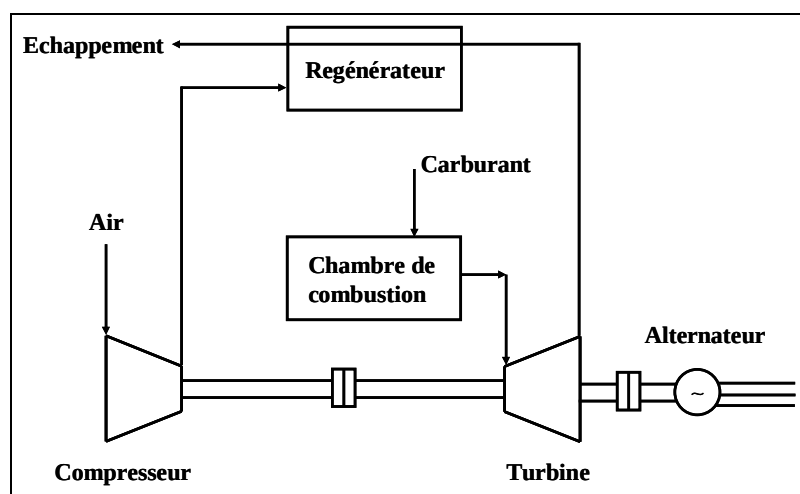


Fig. 10. Centrale électrique équipée d'une Turbine à gaz et d'un régénérateur.

- **Réchauffeur** : on utilise le réchauffeur dans les turbines à gaz à plusieurs étages (au moins deux). Ca consiste à réchauffer le gaz sortant d'un étage de la turbine avant de l'injecter dans le prochain étage voir Fig. 11.

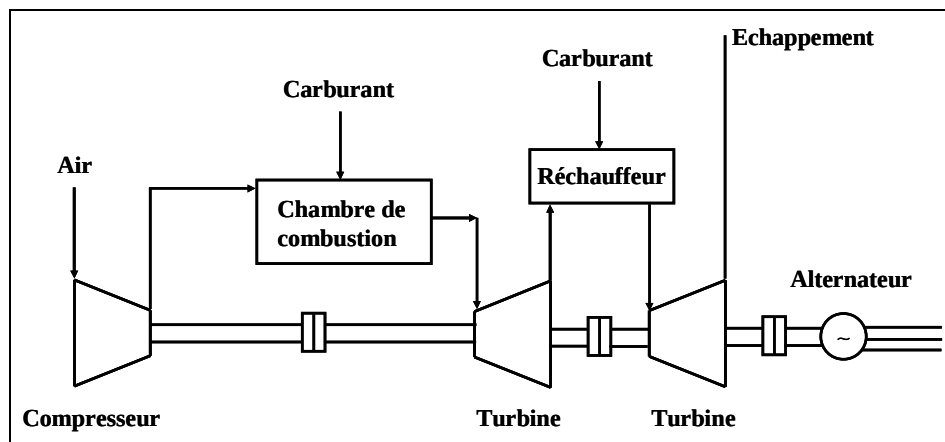


Fig. 11. Centrale électrique équipée d'une Turbine à gaz et d'un réchauffeur.

- **Refroidissement (Intercooling)** : les compresseurs consomment beaucoup d'énergie, par conséquent on augmente le nombre d'étages du compresseur en utilisant un refroidisseur entre deux étages successifs, qui agit comme un échangeur de chaleur, comme c'est indiqué dans la figure ci-dessous. La puissance utilisée pour faire fonctionner le compresseur se voit réduite car le volume d'air refroidi est réduit. Le refroidisseur du compresseur peut être à eau ou à air.

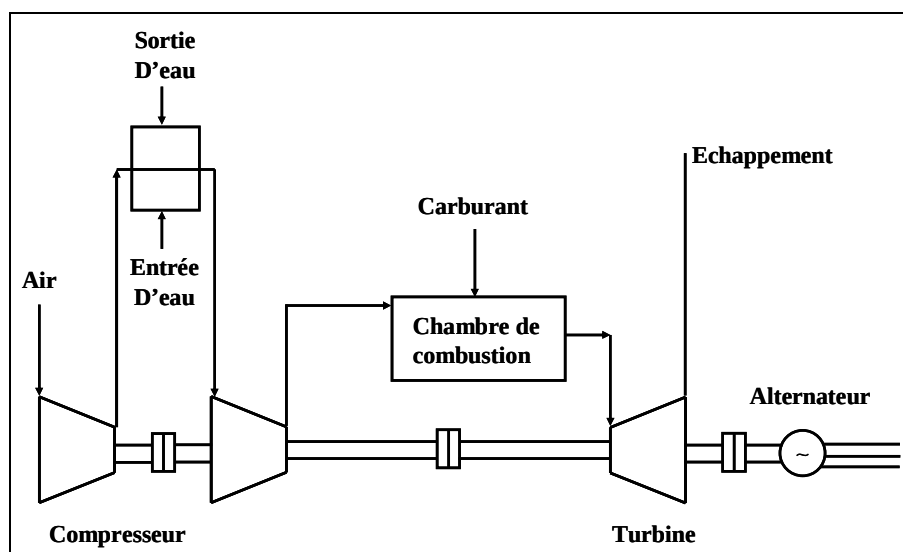
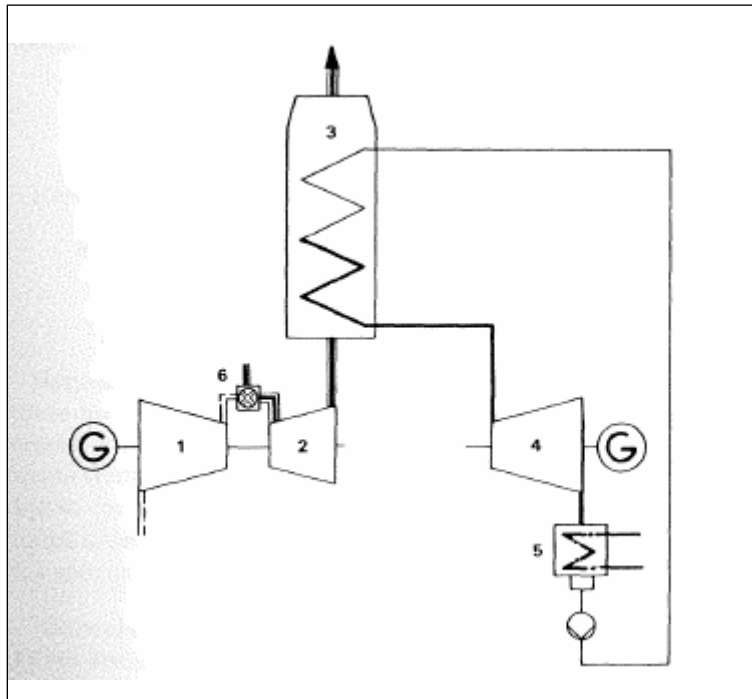


Fig. 12. Centrale électrique équipée d'une Turbine à gaz et d'un refroidisseur.

3.2.2. Centrale électrique à cycle combiné :

Une centrale à cycle combiné utilise les turbines à gaz et à vapeur, c'est donc la combinaison des deux moyens thermique exposés ci-dessus. La figure ci-dessous donne un schéma d'une centrale électrique à cycle combine ouvert. Il est à noter que la génération de la vapeur se fait en utilisant la chaleur des gaz chauds sortant de la turbine à gaz.



- 1 : Compresseur ;
- 2 : Turbine à gaz ;
- 3 : générateur de vapeur ;
- 4 : Turbine à vapeur ;
- 5 : Condenseur ;
- 6 : Alimentation du gaz.

Fig. 13. Centrale électrique équipée d'un cycle combiné.

4. Centrale Nucléaire :

Une centrale nucléaire est une centrale électrique, utilisant la fission nucléaire de matières fissiles pour produire de la chaleur dont une partie est transformée en électricité. C'est actuellement la principale mise en œuvre civile de l'énergie nucléaire.

Une centrale nucléaire est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires (jusqu'à 7), dont la puissance électrique varie de 40 MW à plus de 1 450 MW.

4.1. Description :

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs tranches, identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée (par exemple 900 MW, 1 300 MW ou 1 450 MW). En France, une tranche comprend généralement :

- Le **bâtiment réacteur**, enceinte étanche qui contient principalement le réacteur nucléaire, les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la génération), un pressuriseur, une partie du circuit d'eau secondaire et le circuit d'eau primaire, dont le rôle principal est d'assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur ;
- Le **bâtiment salle des machines**, qui contient principalement :

- o une ligne d'arbre comprenant les différents étages de la **turbine à vapeur** et de **l'alternateur** ;
 - o le **condenseur**.
- Des **bâtiments annexes** qui contiennent notamment des installation diverses de circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur nucléaire et à la maintenance, les tableaux électriques alimentant tous les auxiliaires et générateurs diesel de secours ;
 - Un **aéroréfrigérant atmosphérique** (la partie la plus visible d'une centrale nucléaire), ou simplement une **station de pompage** pour les tranches dont le refroidissement utilise l'eau de mer ou de rivière.

4.2. Différents types de centrales nucléaires :

Ils sont :

- Centrale à **Réacteur à Eau Pressurisée REP** (en anglais PWR, Pressuring Water Reactor) ; ce type de réacteur utilise de l'oxyde d'uranium enrichi comme combustible, et est modéré et refroidi par de l'eau ordinaire sous pression. Les REP constituent l'essentiel du parc actuel de production électrique nucléaire : 60 % dans le monde et 80 % en Europe ;
- Centrale à **réacteur à eau bouillante modérée au graphite** de conception soviétique (RBMK) ;
- Centrale à **réacteur à eau pressurisée** de conception soviétique (WWER) ;
- Centrale à **réacteur à uranium naturel modéré par du graphite**, refroidi par du dioxyde de carbone (filière uranium naturel graphite gaz). En France, les centrale de ce type sont actuellement tous à l'arrêt pour des raisons économiques ;
- Centrale à **réacteur utilisant de l'uranium naturel modéré par de l'eau lourde** (filière canadienne CANDU) ;
- Centrale à **réacteur à eau lourde pressurisée** (PHWR) ;
- centrale à réacteur avancé au gaz (AGR) ;
- Centrale à **réacteur à eau bouillante** (REB) (BWR en anglais) ; ce type de réacteur est assez semblable à un réacteur à eau pressurisée, à la différence importante que l'eau primaire se vaporise dans le cœur du réacteur, ceci en fonctionnement normal ;
- Centrale à réacteur nucléaire à neutrons rapides et à caloporteur sodium, comme Super – Phoenix.

Dans ce qui suit, nous allons présenter le principe de fonctionnement de la production électrique nucléaire en se basant sur les centrale REP (Réacteur à eau Pressurisée).

4.3. Principaux circuits :

Une centrale nucléaire présente, comme une centrale classique, voir Fig. 14, deux circuits indépendants : un circuit eau – vapeur et un circuit eau de refroidissement.

Cependant, par mesure de sécurité, il faut éviter que la vapeur, qui se détend dans les turbines, ait été en contact avec des éléments radioactifs. C'est pourquoi, la production de cette vapeur se fait en deux étapes, ce qui explique l'existence des trois circuits indépendants ci-dessous.

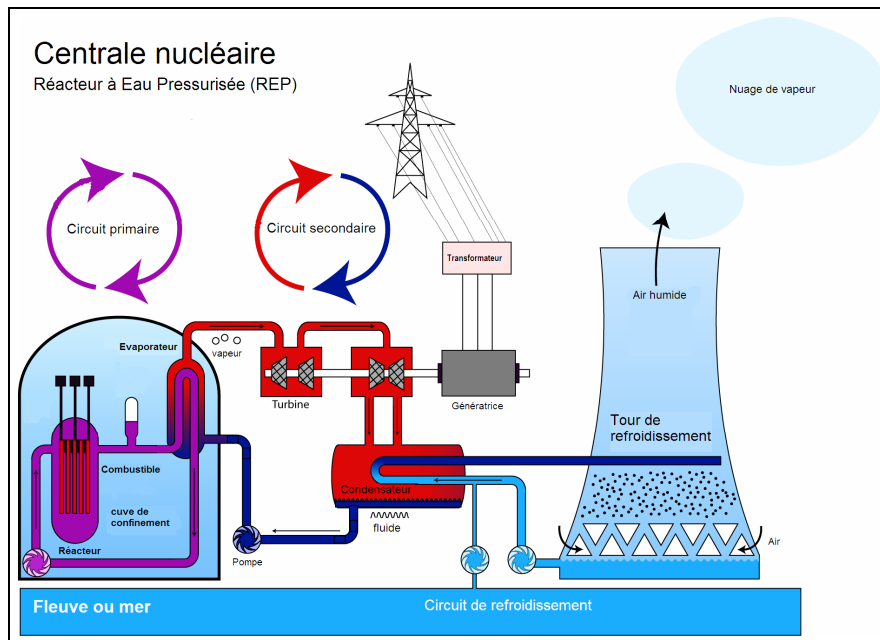


Fig. 14. Principaux circuits d'une centrale nucléaire à réacteur à eau pressurisée (REP).

4.3.1. Circuit primaire :

L'ensemble du circuit primaire est placé dans une tour en béton précontraint qui comporte un portique pour la manutention. Le circuit primaire comprend les éléments suivants :

- Le **réacteur** qui contient le combustible, c'est la partie active de l'installation. Le cœur du réacteur comprend 264 crayons combustibles disposés en carré, voir Fig. 15. Ces crayons sont des tubes en zircaloy de 9,5 mm de diamètre extérieur et de 0,57 mm d'épaisseur, ayant à l'intérieur un empilement de pastilles d'uranium et un bouchon soudé à chacune de leur extrémité. Des espaces libres entre ces crayons sont prévus pour guider une grappe de 24 crayons absorbants destinés au contrôle du réacteur ; ces crayons sont tenus, à leur partie supérieure, par un système de maintien appelé **araignée**. La coupe d'un réacteur est donnée sur la figure Fig. 16 Le fluide **caloporteur** et le **modérateur** dans le cas d'un réacteur à eau pressurisée sont une eau circulant à 150 bars environ dans un circuit totalement étanche aux radiations.

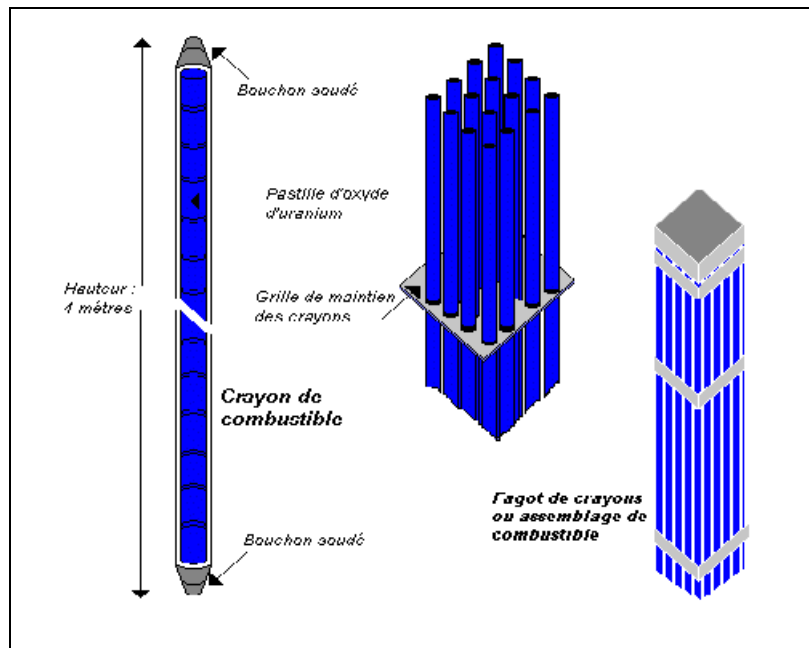


Fig. 15. Combustible utilisé dans les centrales nucléaires REP.

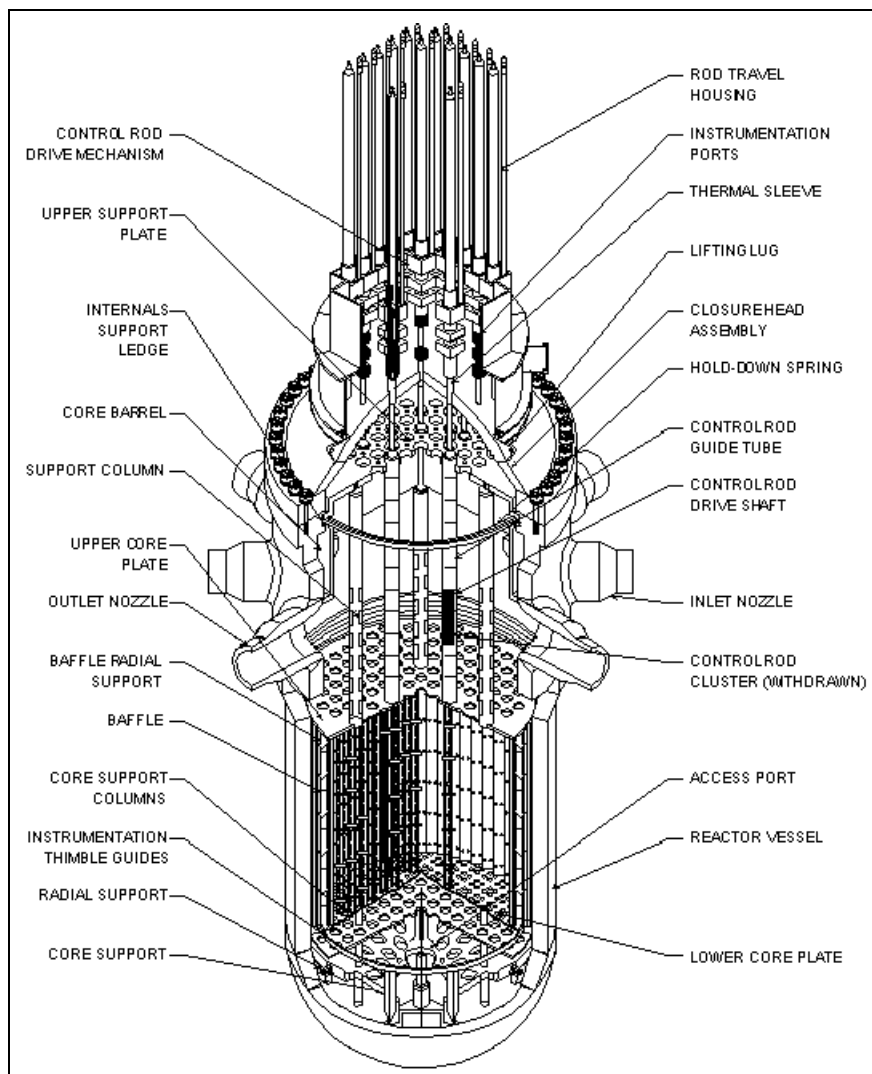


Fig. 16. Coupe d'un réacteur nucléaire.

- Les **échangeurs** qui transmettent au circuit secondaire la chaleur produite par le circuit primaire. Ces échangeurs au nombre de trois ou quatre (suivant le type de tranche) constituent les générateurs de vapeur de la centrale, voir Fig. 14 ;
- Le **préssuriseur** dont le rôle est de maintenir une pression suffisamment élevée (environ 150 bars) pour éviter l'ébullition de l'eau autour du combustible, voir Fig.14 ;
- Les **pompes** (une par échangeur) qui assurent la circulation d'eau dans le circuit primaire, voir Fig.14.

4.3.2. Circuit secondaire :

Ce circuit présente beaucoup d'analogies avec le circuit eau – vapeur d'une centrale classique. Il en diffère cependant par la nature de la vapeur qui d'une part est plus humide, d'autre part est à une température plus basse (donc à une pression plus basse).

Le circuit d'eau secondaire est un circuit fermé, qui se décompose en deux parties :

- entre le condenseur et les générateurs de vapeur, l'eau reste sous forme liquide, c'est l'alimentation des générateurs de vapeur, voir Fig.14 ; des pompes permettent d'élever la pression de cette eau, et des échangeurs de chaleur élèvent la température (60 bars et 220°C) ;
- cette eau se vaporise dans 3 ou 4 générateurs de vapeur et les tuyauteries de vapeur alimentent successivement les étages de la turbine disposées sur une même ligne d'arbre, voir Fig.14. La vapeur acquiert une grande vitesse lors de sa détente permettant ainsi d'entraîner les roues à aubages de la turbine.

Celle-ci est composée de plusieurs étages séparés et comportant chacun de nombreuses roues de diamètre différent. D'abord, la vapeur subit une première détente dans un corps haute pression (HP; de 55 à 11 bar) puis, elle est récupérée, séchée et surchauffée pour subir une seconde détente dans les corps basse pression, (BP; de 11 à 0.05 bar) ; on utilise les corps BP dans le but d'augmenter le rendement du cycle thermo-hydraulique. La sortie du dernier étage de la turbine donne directement sur le condenseur.

4.3.3. Circuit de refroidissement des condenseurs :

Les méthodes de refroidissement sont les mêmes que pour les centrales classiques. Si le débit de l'eau est suffisant, on utilise le cycle couvert, avec restitution de l'eau à la rivière ou à la mer. Dans le cas contraire (ce qui est le cas le plus fréquent), on utilise un courant d'air dans une tour réfrigérante d'où une petite partie (1,5 %) de l'eau s'évapore en forme de panache blanc.

4.4. Réglage de la puissance thermique :

Il est nécessaire de pouvoir régler, à tout instant, la puissance thermique du réacteur pour assurer le débit de vapeur d'eau réclamé par la turbine. Comme la chaleur dégagée par un

réacteur est proportionnelle au nombre de fissions produite dans un temps donné, il appartient au **modérateur** (réduction de la vitesse des neutrons sans les absorber) d'effectuer ce réglage.

Ce pilotage du réacteur peut se faire de deux façons différentes :

- **Moyen d'intervention rapide** : il s'effectue à l'aide d'une grappe de crayons absorbants constitués d'un alliage à base de Cadmium. Pour réduire la puissance thermique, on enfonce ces tiges (crayons) entre les barres d'Uranium, grâce à un système de commande électrique ; quand ces tiges sont complètement enfoncées dans l'enceinte du réacteur, ce dernier est bloqué (plus de production d'énergie thermique) ;
- **Moyen d'intervention lente** : Il est réalisé à l'aide d'acide borique qui est dilué dans l'eau du circuit primaire. Ce deuxième procédé agit plus lentement que le précédent, mais il permet, lui aussi, d'obtenir le blocage du réacteur à une concentration donnée de l'acide borique.

5. Centrales électriques éoliennes :

Les aérogénérateurs sont des machines qui transforment l'énergie contenue dans le vent en énergie électrique. Le principe de fonctionnement est que le vent fait tourner des pales solidaire au rotor d'une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe des petits générateurs éoliens de puissance inférieure ou égale à 10 kW. Il existe également des génératrices éoliennes de puissance comprise entre 500 kW et 2 MW.

5.1. Design des éoliennes modernes :

De nos jours les plus part des éoliennes modernes sont de type horizontales (l'axe du rotor est parallèle au sol). Les principaux unités d'une génératrice éolienne sont (voir Fig. 16) :

- Un **rotor** ;
- Un **train d'entraînement principal** ;
- Une **nacelle** ;
- Le **mat** et les **fondations** ;
- La **commande** ;
- Un **poste de livraison** permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite ; il comprend des disjoncteurs et des transformateurs.

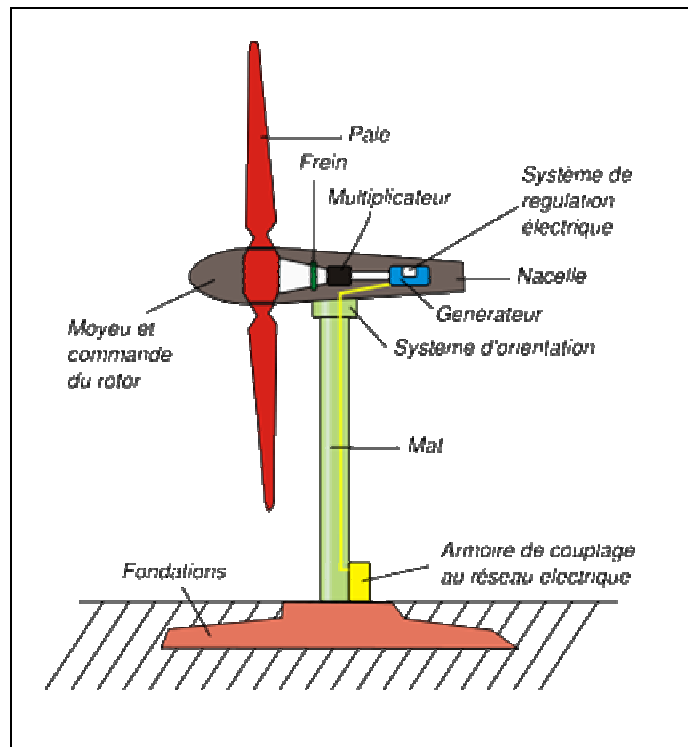


Fig. 16. Eolienne de type aérogénérateur.

5.1.1. Rotor :

Le rotor consiste en un moyeu et de trois à deux pales. C'est la partie la plus importante dans le générateur électrique éolien tant du point de vue performance que du coût.

5.1.2. Train d'entraînement principal :

Elle comprend un arbre à faible vitesse (du côté du rotor), un multiplicateur mécanique, un arbre à grande vitesse (du côté du générateur), des coupleurs et un frein mécanique. Le multiplicateur mécanique permet d'augmenter la vitesse du rotor d'une vitesse basse (de quelques dizaines de tr/min) à une vitesse assez élevée pour l'entraînement d'un générateur standard (centaines ou milliers de tr/min).

5.1.3. Générateur :

Les machines utilisées sont :

- **Génératrice synchrone** : elle est utilisée occasionnellement, pour la connexion à un grand réseau électrique ou en association avec des convertisseurs pour des aérogénérateurs à vitesse variable. Ce type de génératrice est démarré par l'action du vent et une fois qu'elle est connectée au réseau un contrôle de la vitesse est nécessaire pour maintenir la vitesse de synchronisme (fréquence du réseau).
- **Génératrice asynchrone** : c'est la plus communément utilisée dans les éoliennes. Elle sont démarrées des deux manières suivantes :

- o Utilisation du vent pour accroître la vitesse du rotor à la valeur de fonctionnement normal de la génératrice ; il est à noter que ce contrôle se fait à l'aide de l'orientation des pales. Une fois que la génératrice est connectée au réseau, une surveillance de la vitesse de rotation est nécessaire afin de la garder la plus proche possible de la vitesse de synchronisme.
 - o Connecter la génératrice au réseau électrique et la faire fonctionner en moteur ce qui aura pour effet d'augmenter la vitesse du rotor à la valeur de fonctionnement normal de la génératrice. Avec ce système, la vitesse du vent doit être surveillée pour voir quand celui-ci provoque une vitesse du rotor comprise dans une plage appropriée pour un bon fonctionnement en générateur de la machine asynchrone (cette surveillance est nécessaire pour pouvoir basculer la machine asynchrone du fonctionnement moteur à celui de générateur).
- **Génératrice synchrone à aimant permanent** : ce type de machine est amené à être plus fréquemment utilisé pour équiper les éoliennes. Actuellement c'est le choix favori pour des éoliennes de puissance supérieure à au moins 10 kW.

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans les centrales éoliennes connectées à un réseau électrique car elles fonctionnent dans une étroite plage de vitesse légèrement plus large que celle des machines synchrones, elles sont robustes, moins chères et facile à connecter au réseau électrique.

Il est possible d'utiliser une commande de vitesse de la génératrice pour un fonctionnement à maximum de rendement sur une large plage de vitesse du vent, impliquant une augmentation de l'énergie captée.

5.1.4. Nacelle et système d'orientation :

La nacelle est montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.

Le système d'orientation est nécessaire pour garder le rotor correctement aligner avec le vent. Ce système comprend un ou deux moteurs commander automatiquement à l'aide d'un capteur de vent placé dans la nacelle. Il existe également un système d'orientation libre c'est-à-dire qu'il y a un auto – alignement de la nacelle.

5.1.5. Mat et fondation :

Les principaux mats utilisés sont des tubes en acier, poutres triangulaires ou en béton. La hauteur des mats est 1 à 1.5 fois le diamètre du rotor (pales), mais dans tous les cas la hauteur minimale est de 20 m.

5.1.6. Commandes :

La commande du générateur éolien implique les trois principaux aspects :

- Fixation des limites supérieures et limitation du couple du train d'entraînement ; il faut noter que les deux couples, aérodynamique et électrique, doivent être commandés ;
- Maximiser la tenue à la fatigue du rotor du train d'entraînement et les composants des autres structures étant donné les changements de la direction et de la vitesse du vent ainsi que les turbulences et les cycles start-stop de l'éolienne. Ce contrôle est effectué en évitant au maximum les changements brusques dans le fonctionnement du système.
- Maximiser la production de l'énergie.

5.2. Puissance produite :

La puissance produite par une génératrice éolienne varie avec la vitesse du vent et chacune d'elle est caractérisée par sa courbe de puissance. Cette courbe est fonction des trois points suivants :

- **Vitesse de conjonction** : vitesse du vent minimale pour la quelle la machine peut produire une puissance utile ;
- **Vitesse nominale du vent** : vitesse du vent pour la quelle la puissance nominale (en générale maximale) est produite ;
- **Vitesse de disjonction** : vitesse maximale du vent pour la quelle la machine produira une puissance (limitée habituellement par les constructeur pour des raisons de sécurité et de contraintes).

5.3. Fermes éoliennes :

Une ferme éolienne est une centrale électrique équipée de plusieurs génératrices éoliennes qui sont électriquement connectées. L'avantage est d'accroître, pour une zone donnée propice à ce type de production électrique, la puissance électrique produite et de diminuer les coûts.

5.4. Avantages et inconvénients de la production éolienne :

Les avantages sont

- L'énergie primaire d'origine éolienne est :
 - o gratuite - le vent ;
 - o renouvelable ;
 - o sans production de déchets ;
 - o en principe sans danger notable pour l'homme ;
- La fabrication des 3 éléments d'un aérogénérateur (pale, générateur et mat) ;
- Le coût de fabrication est comparable à celui de générateurs hydrauliques de puissance équivalente. Ces avantages certains sont aussi ceux de l'énergie hydraulique.

Les inconvénients de la production électrique éolienne est sa disponibilité qui peut être faible, très intermittente (le vent souffle pendant des durées très variables) ou imprévisible (vent souffle n'importe quand).

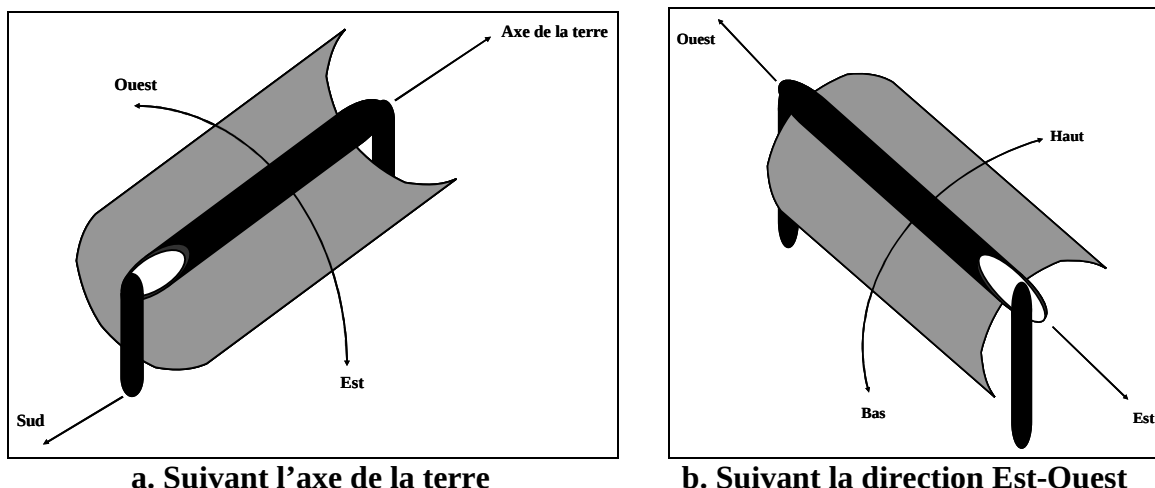
6. Centrales solaires :

6.1. Capteurs solaires :

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer le maximum d'énergie provenant du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

Pour l'application qui nous intéresse (production électrique), les capteurs utilisés sont de type cylindro-parabolique qui permet au fluide caloporteur (circulant dans un cylindre) d'atteindre des températures moyennes au moyen des rayons solaires captés et réfléchies (vers le cylindre) par une surface parabolique. Il existe deux montages pour un tel capteur :

- **Montage suivant l'axe du monde** : le tube récepteur (contenant le fluide caloporteur) est parallèle à l'axe de rotation de la terre. Le suivi du soleil nécessite un asservissement en rotation autour de cet axe, voir Fig. 17.a.
- **Montage Est-Ouest** : le tube récepteur est orienté sud-Ouest. Il faut orienter le capteur vers le soleil deux à trois fois par jour pour optimiser la réception du rayonnement. Pour améliorer le rendement, il est nécessaire d'ajouter un asservissement en rotation, voir Fig. 17.b.



a. Suivant l'axe de la terre

b. Suivant la direction Est-Ouest

Fig. 18. Montage d'un capteur cylindro-parabolique.

6.2. Centrale solaire thermoélectrique :

Elle transforme l'énergie lumineuse en provenance du soleil dans un premier temps en énergie thermique puis dans un deuxième temps en électricité. Vouloir produire de l'électricité à partir de la voie thermodynamique oblige à satisfaire au principe de Carnot ; il sera donc nécessaire d'élever la température de la source chaude pour accroître le rendement de Carnot

(ce dernier est égal à $1 - \frac{T_f}{T_c}$ où T_f et T_c sont la température des sources respectivement froide et chaude)

Ce type de centrale peut être :

- Un champ d'héliostats qui renvoie le rayonnement vers une chaudière placée en haut d'une tour ; ce moyen est utilisé pour avoir des températures élevées. Le principe d'une telle centrale est le suivant : un champ d'héliostats fait convertir le rayonnement solaire à l'entrée d'une chaudière dans la quelle circule un fluide caloporteur qui stocke l'énergie thermique dans un réservoir ; celui-ci alimente en énergie un générateur de vapeur qui une fois dans la turbine se détend ce qui a pour effet d'entraîner l'alternateur (cycle normal d'une génératrice à vapeur). Le schéma de principe d'une telle centrale est donné sur la figure ci-dessous.

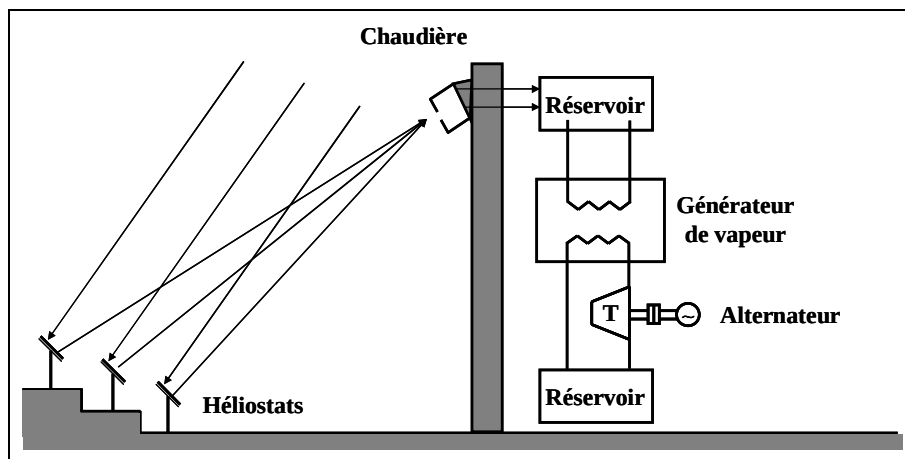


Fig. 19. Schéma de principe d'une centrale à tour.

- Récepteurs cylindo-paraboliques chauffant un fluide caloporteur. Ce procédé est utilisé quand une température moyenne est suffisante pour la production électrique.

6.3. Centrale Photovoltaïque :

6.3.1. Cellules photovoltaïques :

Ces cellules transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique ; ce qui, pour une centrale électrique équipée de ces cellules, l'installation thermique, lourde et compliquée, n'est plus nécessaire. Cependant, le rendement atteint par une telle centrale est du même ordre que celui obtenu avec une filière thermodynamique.

Une photopile est constituée d'un matériau absorbant l'énergie des photons et la transforme en énergie électrique ; le matériau de base actuellement utilisé est le silicium. Dans le schéma simple d'un matériau à deux niveaux d'énergie, voir Fig.20, un électron possédant l'énergie E_1 appartient à la bande de valence et se trouve lié à l'atome. S'il reçoit une énergie (sous la forme d'un photon par exemple) qui lui permet d'atteindre le niveau E_2 , énergie correspondante à la bande de conduction, il devient libre et peut alors participer à un courant

électrique. Cette énergie nécessaire pour libérer l'électron est notée E_g , voir figure ci-dessous.

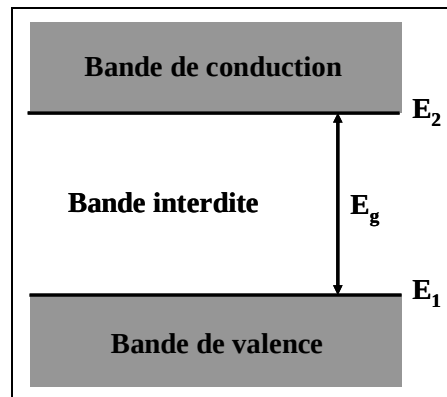


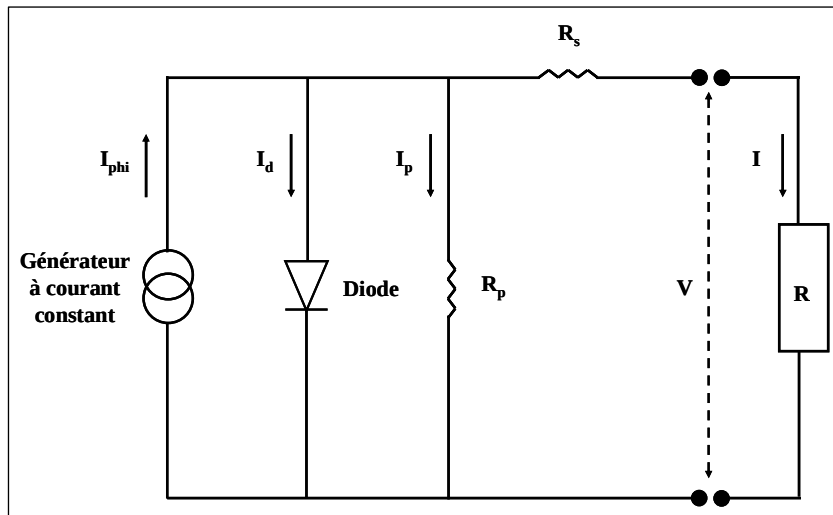
Fig. 20. Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi-conducteur.

Mais pour qu'un électron libéré par absorption d'un photon participe à un courant utile, il faut le canaliser, le collecter, c'est le rôle de la dissymétrie électrique que l'on obtient par création d'une jonction entre deux semi-conducteurs de types différents (P et N).

Le rendement d'une pile photovoltaïque est altéré par différents phénomènes :

- Absorption incomplète des photons ;
- L'excès d'énergie de certains autres ;
- La réflexion à la surface de la photopile (qui peut être atténuée par un traitement de surface) ;
- La collecte incomplète des porteurs, dans ce cas le courant qui circule (généralisé, I_{phi}) est inférieur au courant idéal ;
- Le facteur de tension qui tient compte de la tension réellement mesurée lorsqu'un électron de charge q saute la bande interdite. La tension maximale de sortie, mesurée aux bornes de la photopile en circuit ouvert est toujours inférieure à la tension idéale (égale au rapport de l'énergie de la bande interdite sur q) ;
- Le matériau semi-conducteur présente une résistance série et une autre parallèle (R_s , R_p) ;
- La caractéristique courant – tension d'une photopile n'est pas rectangulaire. Pour un éclaircissement, une température et une surface donnés ; la photopile fournit un courant en court circuit et une tension en circuit ouvert. Si elle débite sur une résistance de charge, la tension aux bornes de la photopile n'est plus nulle et le courant d'obscurité I_d (dû à la jonction PN, semi-conducteur) s'accroît exponentiellement, réduisant d'autant plus le courant de charge.

Compte tenu des remarques ci-dessus, on peut présenter une photopile par le circuit électrique équivalent de la figure ci-dessous.



I_{phi} : photo courant ;
 I_d : courant d'obscurité ;
 I_p : courant dû à R_p ;
 V : tension de charge ;
 R_p : résistance parallèle ;
 R_s : résistance série ;
 R : résistance de charge.

Fig. 21. Circuit électrique équivalent d'une photopile.

Il est à noter qu'une pile photovoltaïque n'impose ni un courant ni une tension mais un couple (courant, tension) déterminé par la résistance de charge.

6.3.2. Mise en oeuvre :

Dans la pratique les panneaux photovoltaïque regroupent généralement des cellules élémentaires en série et en parallèle afin d'obtenir suffisamment de courant (parallèle) sous une tension acceptable (série). La puissance d'un tel panneau est donnée en Watt crête (Wc).

Pour lutter contre les agressions extérieures (humidité grêle, vent...) le module est mis, par exemple, entre deux plaques de verre.

Il faut également penser au refroidissement du panneau, car le rendement des photopiles étant faible, une grande partie du rayonnement est transformée en chaleur qu'il est nécessaire d'évacuer pour éviter un échauffement trop important de l'installation. Il est obtenu, le plus souvent, par convection.

Une installation photovoltaïque ne se limite pas aux panneaux photovoltaïques. En effet, il faut leur associé :

- Des **batteries** pour tenir compte du déphasage entre la production électrique et la consommation ;
- Une **diode anti-retour** qui évite le déchargement des batteries lorsque les panneaux ne sont plus ensoleillés ;
- Un **régulateur** qui gère la charge des batteries en leur évitant d'être en surcharge ou en décharge profonde ;
- Eventuellement un **onduleur** pour transformer le courant continu en courant alternatif.

6.3.3. Avantages et inconvénient de ce type de production électrique :

Comme avantage on peut citer :

- Absence de pièces mobiles, source de pannes potentielles ;
- Possibilité de moduler facilement la puissance installée en faisant varier le nombre de panneaux photovoltaïques connectés ;
- Coût de fonctionnement négligeable ; en effet il faut prendre soins juste à maintenir propre la surface des panneaux ;
- Absence de pollution (ni émission de gaz ni bruit) ;
- Energie primaire gratuite et renouvelable.

Les inconvénients sont :

- Une technologie de fabrication délicate et complexe et est loin d'être exempte de pollution ;
- L'obligation de prévoir des batteries de stockage pour subvenir aux besoins durant les périodes nocturnes ;
- Obligation de prévoir un onduleur.