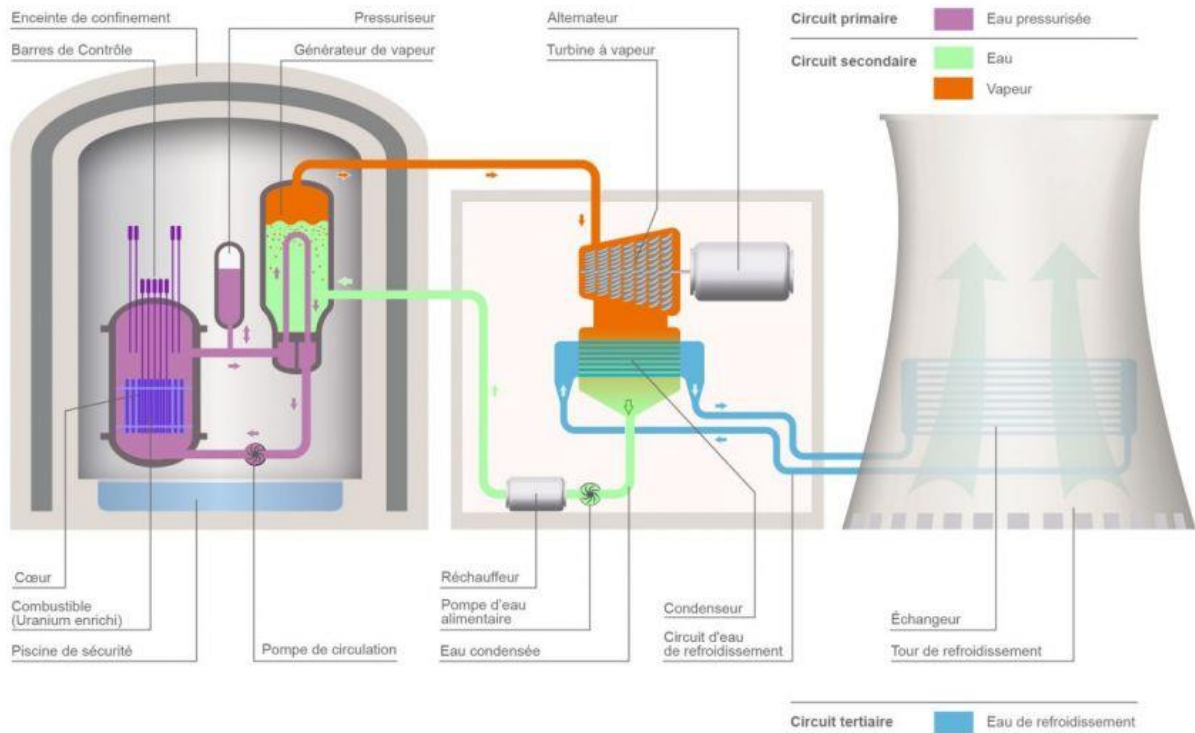


Comparaison de plusieurs modes de production d'électricité

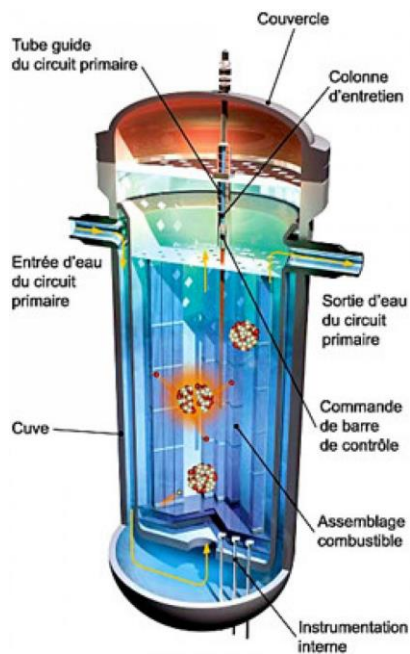
I La centrale nucléaire :

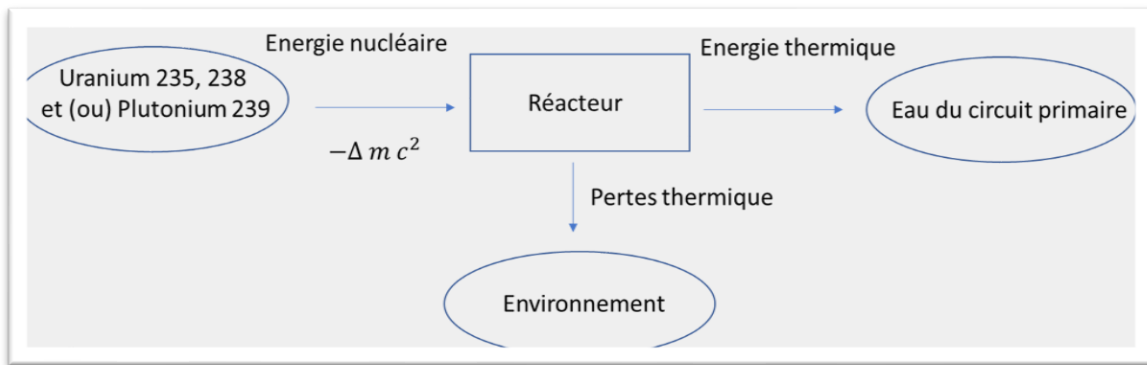
Voyons d'abord les principaux organes ainsi que leurs diagrammes de conversion énergétique.

Principe des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)

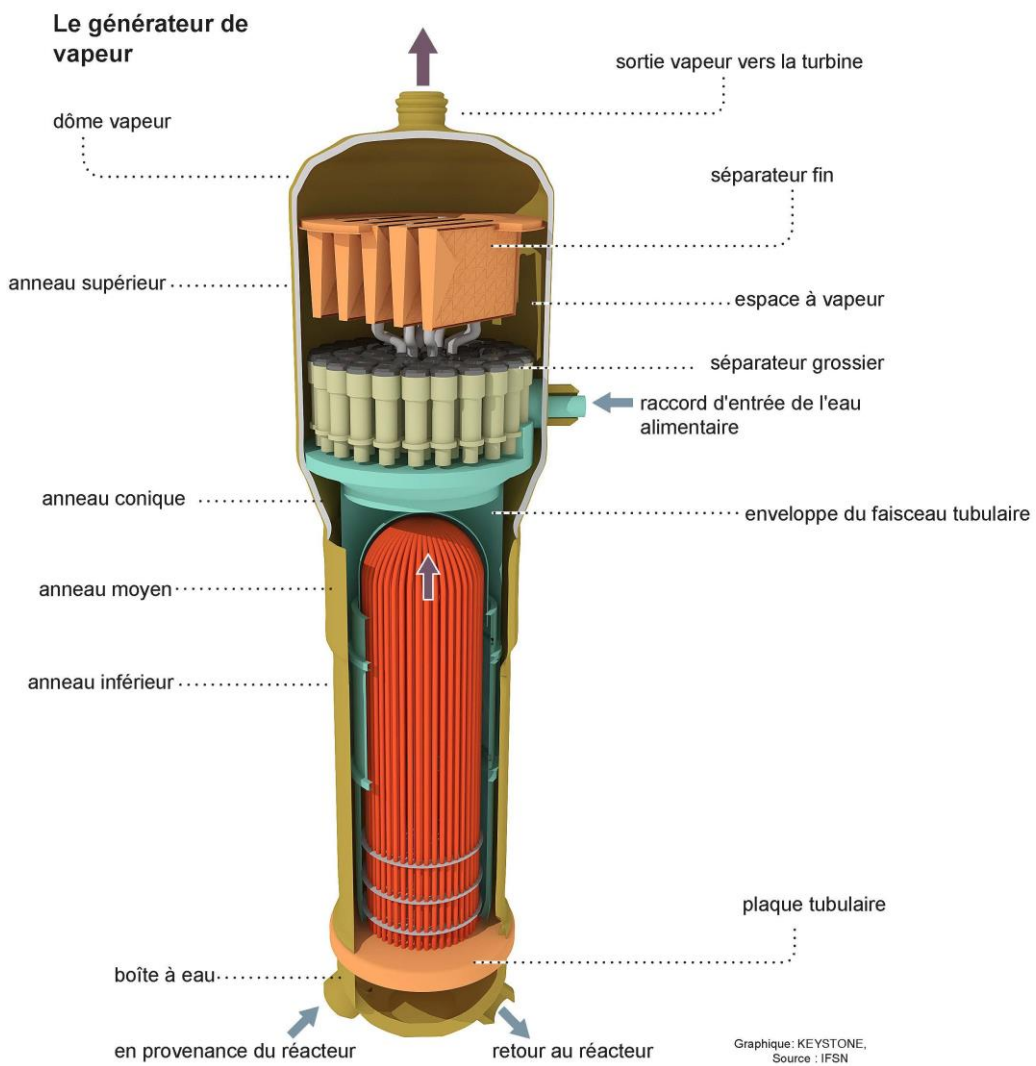


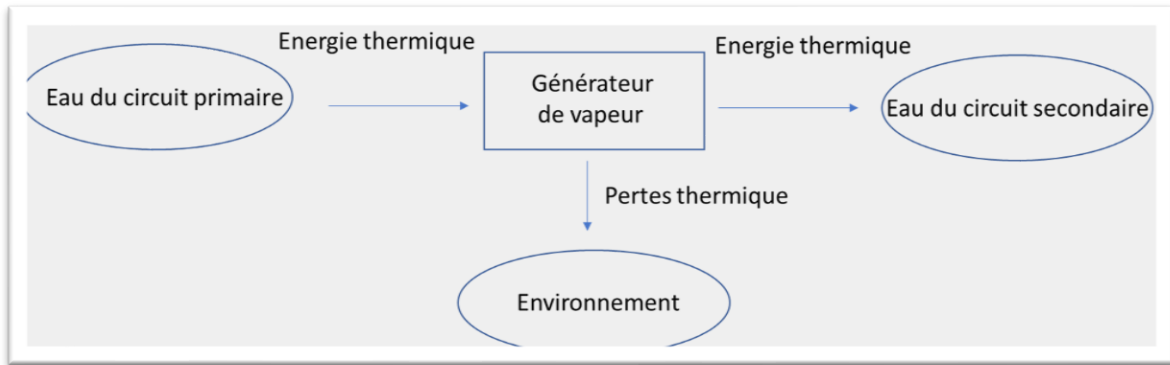
a) Le réacteur nucléaire



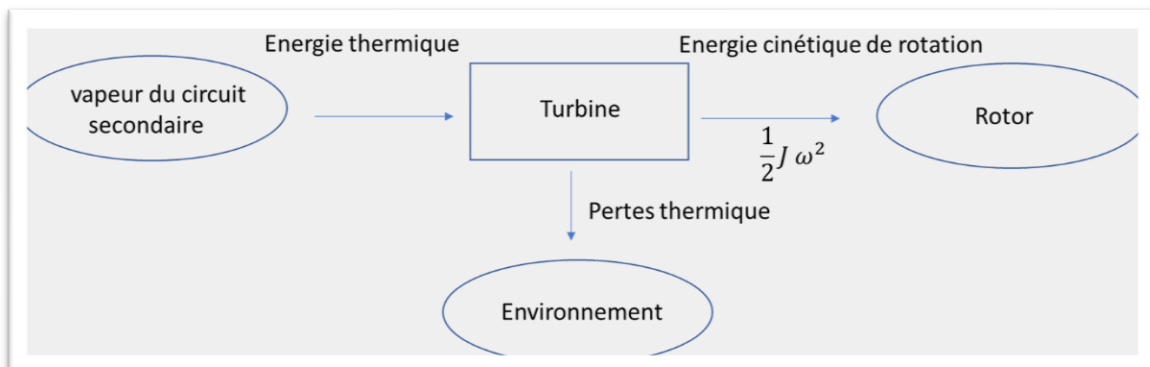


b) Le générateur de vapeur

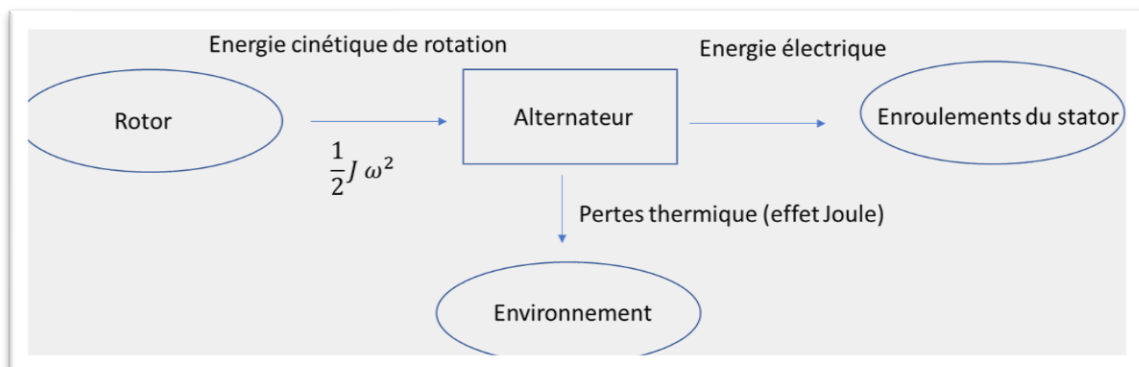




c) La turbine

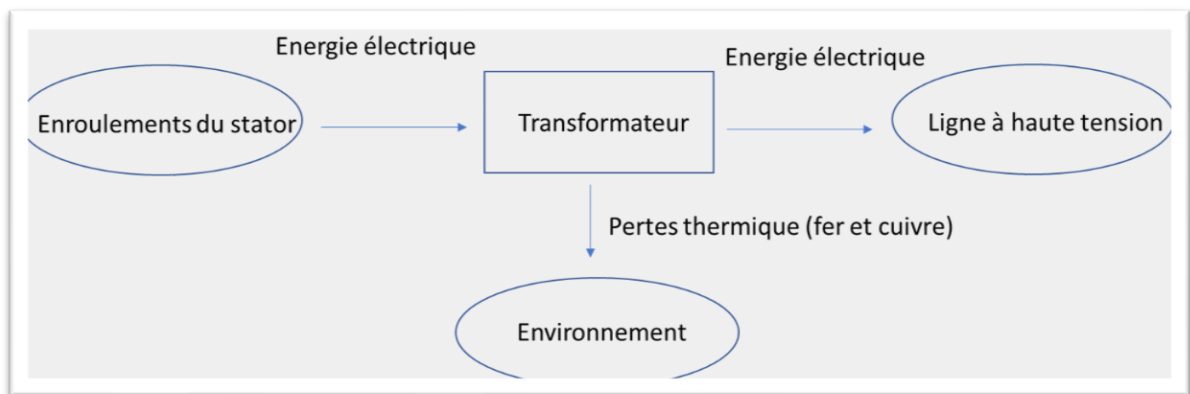


d) L'alternateur



e) Le transformateur





Puissance moyenne d'une tranche nucléaire

Une tranche nucléaire correspond à un réacteur nucléaire. Un site nucléaire comporte généralement 4 tranches d'une puissance d'environ **1000 MW**. Sur la photo, on peut identifier quatre réacteurs et quatre tours, chacune associée à un réacteur. Il y a 58 réacteurs nucléaires en France répartis sur 19 sites de production.



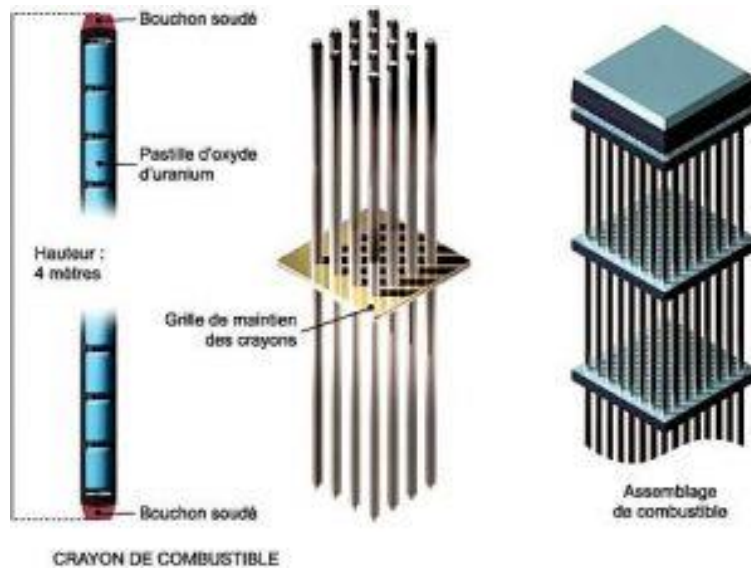
Le réacteur le plus puissant au monde est en construction en France dans la centrale de Flamanville. Il fournira une puissance électrique de 1650 MW.

Principe de la réaction nucléaire

L'énergie nucléaire provient de la fission d'atomes d'Uranium 235 et de Plutonium 239.

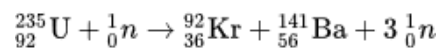
La source d'énergie nucléaire est formée d'un mélange d'oxydes d'Uranium et éventuellement d'oxyde de Plutonium (cas du MOX) fondu en pastilles, lesquelles sont insérées dans des tubes en zirconium,

ce dernier ayant la propriété de ne pas absorber les neutrons, rendant la réaction en chaîne de fission plus efficace.

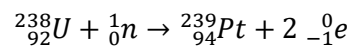


Dans le cas d'un mélange d'Uranium 235 et d'Uranium 238, seul le premier est **fissile**.

La réaction de fission d'un atome d'uranium 235 est la suivante :



Quant à l'uranium 238, il est dit **fertile** en capturant un neutron selon la réaction suivante, produisant du Plutonium qui est lui fissile.



La fission du Plutonium ainsi créé contribue pour une part à l'énergie thermique produite dans le réacteur, l'autre part, la plus grande, étant le fait de la fission de l'uranium 235, si le combustible ne contient que de l'uranium au départ.

Rendement d'un réacteur nucléaire

Un réacteur nucléaire produisant une puissance électrique de 1000 MW, ce qui permet d'alimenter environ 450 000 foyers, nécessite l'usage de 27 tonnes d'uranium enrichi. Cependant, la proportion massique de l'uranium 235 dans l'uranium naturel est de 0,7 %. On procède donc à l'enrichissement en uranium 235 d'un mélange des deux isotopes mis en phase gazeuse sous forme d'hexafluorures d'uranium (UF₆) et le mélange s'enrichit en hexafluorure d'uranium 235 en passant à travers une série de centrifugeuses.



Dans les pastilles de « combustible », la teneur en uranium 235 est de 3 à 5 %.

Un calcul approximatif peut permettre de se faire une idée du rendement d'un réacteur nucléaire défini comme :

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile (électrique)}}{\text{Puissance thermique dégagée par la réaction nucléaire}}$$

Dans notre exemple, la puissance utile est de 1000 MW, celle d'un réacteur de puissance moyenne. Pour calculer la puissance thermique dégagée par la réaction nucléaire, nous allons faire une hypothèse : L'énergie dégagée provient de la fission de tous les atomes d'uranium 235, ce qui peut se justifier en considérant qu'il reste une fraction de ces atomes qui n'a pas fissionné au moment du retrait des barres usagées de combustible mais que cette fraction est à peu de chose près celle des atomes d'uranium 238 qui, après avoir été transmutés en Plutonium 239 par capture neutronique, ont fissionné.

Ainsi, partant de 27 tonnes d'uranium requis sur un an d'exploitation, nous en déduisons, avec nos hypothèses que 5 % de cette masse, soit $0,05 \times 27 = 1,35$ tonnes d'uranium 235 ont été fissionnés. Or, chaque fission d'un atome d'uranium 235 libère une énergie $E_1 = 2,9 \times 10^{-11} \text{ J}$ et le nombre d'atomes d'uranium 235 contenus dans les 1,35 tonnes est obtenu par la formule :

$$N = \mathcal{N} \times n$$

où n est le nombre de moles d'atomes d'uranium 235 dans les 1,35 tonnes et \mathcal{N} le nombre d'atomes dans une mole (nombre d'Avogadro qui vaut $6,02 \times 10^{23}$). Or :

$$n = \frac{m}{M}$$

où m est la masse d'atomes d'uranium 235 qu'il faut convertir en grammes et M la masse molaire atomique de l'uranium 235 qui vaut 235 g/mol .

L'énergie libérée sur un an par les 1,35 tonnes d'uranium 235 est donc :

$$E = \mathcal{N} \times \frac{m}{M} \times E_1$$

Soit numériquement :

$$E = 6,02 \times 10^{23} \times \frac{1,35 \times 10^6}{235} \times 2,9 \times 10^{-11} \approx 1,00 \times 10^{17} \text{ J}$$

Cette énergie rapportée à la seconde, donne la puissance thermique libérée par la réaction nucléaire :

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1,00 \times 10^{17}}{365 \times 24 \times 3600} \approx 3,2 \times 10^9 J = 3200 MJ$$

On en déduit le rendement du réacteur :

$$\eta = \frac{1000}{3200} \approx 31 \%$$

Cette valeur est proche de la valeur réelle qui est autour de 35 %. A titre de comparaison, la centrale de Flamanville génère une puissance électrique de 2760 MW pour une puissance thermique dégagée par la réaction nucléaire de 7600 MW, ce qui donne un rendement de :

$$\eta = \frac{2760}{7600} \approx 36 \%$$

Comparaison des avantages et inconvénients de la production d'électricité à partir du nucléaire et du charbon.

Pour fournir une puissance électrique équivalente de 1000 MW, une centrale à charbon doit consommer 260 tonnes de charbon par heure, ce qui, sur un an, donne une masse consommée de $260 \times 24 \times 365 = 2\,277\,600$ tonnes soit environ 2,3 Mégatonnes de charbon, ce qui représente une masse environ cent mille fois plus grande que celle d'uranium. Il y a donc un impact environnemental bien plus important lié à l'extraction du charbon (sans tenir compte des résidus de traitements laissés sur place).

La combustion d'1 kg de charbon fournit une énergie thermique de 8,9 kWh. L'énergie thermique libérée par heure par la combustion du charbon pour une centrale de 1000 MW est donc :

$$E = 260 \times 10^3 \times 8,9 \approx 2\,314\,000 \text{ kWh}$$

La puissance thermique libérée est donc :

$$P = \frac{2\,314\,000 \text{ kWh}}{1 \text{ h}} = 2\,314\,000 \text{ kW} = 2\,314 \text{ MW}$$

Le rendement est donc :

$$\eta = \frac{1000}{2\,314} \approx 43 \%$$

Ce rendement est meilleur que pour la centrale nucléaire, même s'il reste faible comme pour cette dernière. Il est à comparer au rendement d'un barrage hydroélectrique qui est voisin de 90 %. Ce fait est normal car, tant pour la centrale nucléaire que pour la centrale à charbon (ce serait pareil au gaz ou au fuel), il s'agit de convertir une énergie thermique (c'est-à-dire désordonnée) en une énergie ordonnée (mécanique pour mettre en rotation la turbine puis électrique via l'alternateur). Or ce passage d'une énergie désordonnée à une énergie ordonnée se fait au prix d'un mauvais rendement, c'est une affaire de thermodynamique et un principe aussi étudié en supérieur, celui de l'entropie, qui dit qu'un système qui n'échange rien avec l'extérieur (ni travail, ni chaleur, ni rayonnement), ne peut voir ses formes d'énergie ordonnées (mécanique macroscopique, potentielle de pesanteur, chimique, nucléaire...) qu'évoluer vers des formes d'énergie désordonnées.

C'est au niveau de la turbine que le rendement est faible, car pour recevoir de l'énergie, cette dernière doit voir une pression en amont sur ses ailettes plus forte que la pression en aval, sinon ces dernières ne pourraient se mettre en mouvement et c'est la condensation des vapeurs en aval grâce au circuit tertiaire de refroidissement alimenté par l'eau d'un fleuve que cela s'opère. La perte énergétique est alors visible dans le ciel sous forme de panaches de vapeur.

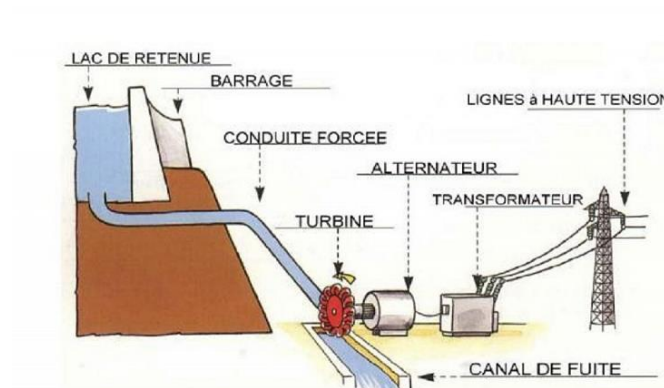


On peut retrouver ce phénomène de piètre rendement dans les capteurs solaires photovoltaïques convertissant l'énergie rayonnante du soleil (qui est une forme désordonnée d'énergie) en électricité (forme ordonnée car mouvement d'ensemble ordonné d'électrons) et pour lesquels le rendement se situe autour de 15 %. En revanche, pour un barrage, on convertit une énergie potentielle de pesanteur (qui est une énergie macroscopique ordonnée) en énergie mécanique de rotation sur une turbine, ce qui autorise un bon rendement.

Centrale nucléaire à fission	Centrale nucléaire à fusion	Centrale à charbon, Gaz, fuel	Centrale hydroélectrique
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consomme peu d'uranium • Ne rejette pas de CO_2 pendant son exploitation <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Risques d'accidents (Tchernobyl, Fukushima) 	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consomme peu d'hydrogène et de lithium • Ne rejette pas de CO_2 pendant son exploitation • Réserves pour des millions d'années <p>Inconvénients</p>	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grandes réserves mondialement réparties <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rejette massivement du CO_2 pendant son exploitation • Impact environnemental important • Condition de travail difficiles dans les mines 	<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement • Ressource inépuisable <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Impact environnemental • Modification de la faune et de la flore en amont

<ul style="list-style-type: none"> • Réserves limitées à 70 à 90 ans • Stockage des déchets radioactifs 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques d'accidents ? • ????? 		
---	--	--	--

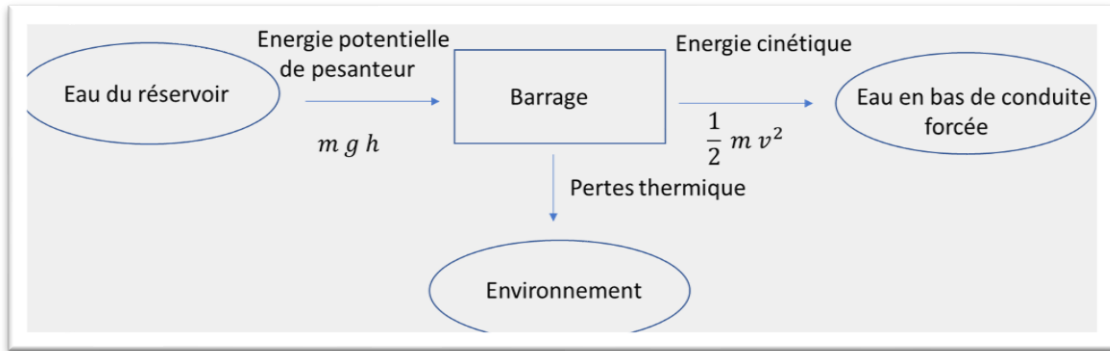
2 La centrale hydroélectrique :



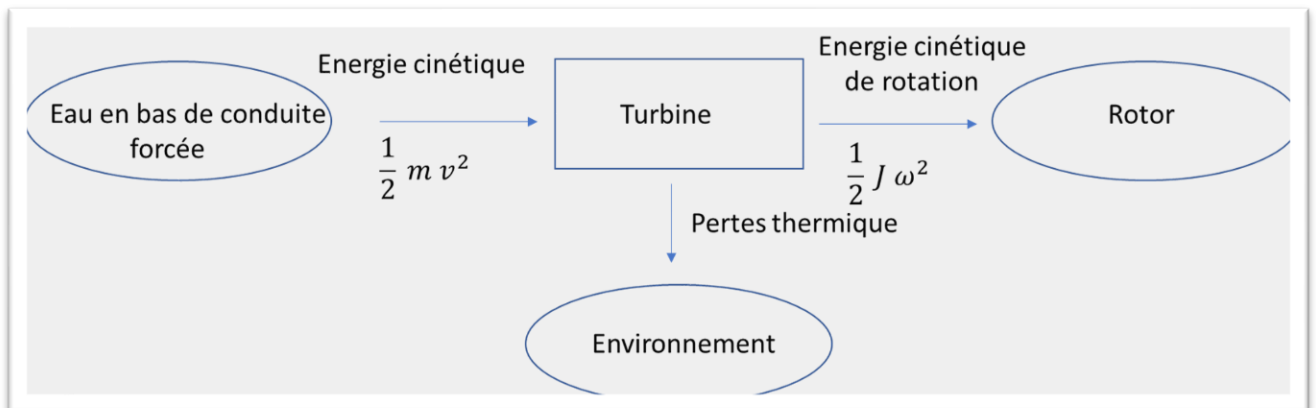
a) le barrage et la conduite forcée



Barrage des trois gorges en Chine



b) La turbine



c) L'alternateur et le transformateur

ceux-ci ainsi que les diagrammes de conversion sont analogues à ceux rencontrés dans les autres centrales électriques.

Puissance d'un barrage hydroélectrique :

La puissance varie d'un barrage à l'autre selon le débit du réservoir et la hauteur de chute. Le plus puissant barrage au monde est le barrage des Trois Gorges situé en Chine sur le fleuve Jangzi Jiang. Il fournit une puissance de 22 500 MW soit environ la puissance d'un peu plus d'une vingtaine de réacteurs nucléaires de puissance moyenne ou encore 5 sites nucléaires. Par comparaison, le barrage français fournissant la plus grande puissance est le barrage de Grand'Maison dans l'Isère avec une puissance électrique de 1800 MW, soit plus de dix fois moindre que celle du barrage des Trois Gorges.

Pour reprendre l'exemple de ce dernier, sa puissance s'explique ainsi, le dénivelé étant $h = 113 \text{ m}$, le débit du fleuve $D = 14\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ et la masse volumique de l'eau ρ :

Chaque seconde, la perte d'énergie potentielle du système formé par l'eau du fleuve (partie amont et aval comprises) correspond à celle d'une masse d'eau $m = D \rho$ qui a subi un dénivelé égal à la hauteur de chute h . Par conservation de l'énergie, cette perte d'énergie potentielle se retrouve en énergie mécanique fournie à la turbine et en pertes thermiques liées à la friction sur les parois de la conduite forcée et au moment du choc sur les éléments de la turbine. Ainsi, en considérant un taux de pertes de 10 % soit un rendement de 90 % :

$$P = 0,90 \times D \rho g h$$

soit numériquement :

$$P = 0,90 \times 14\,300 \times 1000 \times 9,8 \times 113 = 14,3 \times 10^9 \text{ W} = 14\,300 \text{ MW}$$

Rendement d'un barrage hydroélectrique

Nous prenons l'exemple du barrage de Tignes-Malgovert dont les données sont :

- Puissance mécanique fournie par la turbine : 320 MW
- Rendement de l'alternateur : 98 %
- Hauteur de chute : 750 m
- Débit de l'eau : $48 \text{ m}^3/\text{s}$

La puissance de la chute d'eau (perte d'énergie potentielle) est :

$$P_{chute} = D \rho g h = 48 \times 1000 \times 9,8 \times 750 = 352\,800\,000 \text{ W} = 352,8 \text{ MW}$$

La puissance utile (électrique) est celle fournie par l'alternateur (on néglige la perte de puissance dans le transformateur). Ainsi :

$$P_{utile} = 0,98 \times 320 = 313,6 \text{ MW}$$

Le rendement est donc :

$$\eta = \frac{313,6}{352,8} \approx 89 \%$$

