
Analyse énergétique des centrales électriques

Filière Ingénieur Électronique,
Électrotechnique et Automatique.

Centrales hydroélectriques

- **L'énergie hydraulique** est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes:
 - ❑ chute;
 - ❑ cours d'eau;
 - ❑ marée.

Centrales hydroélectriques

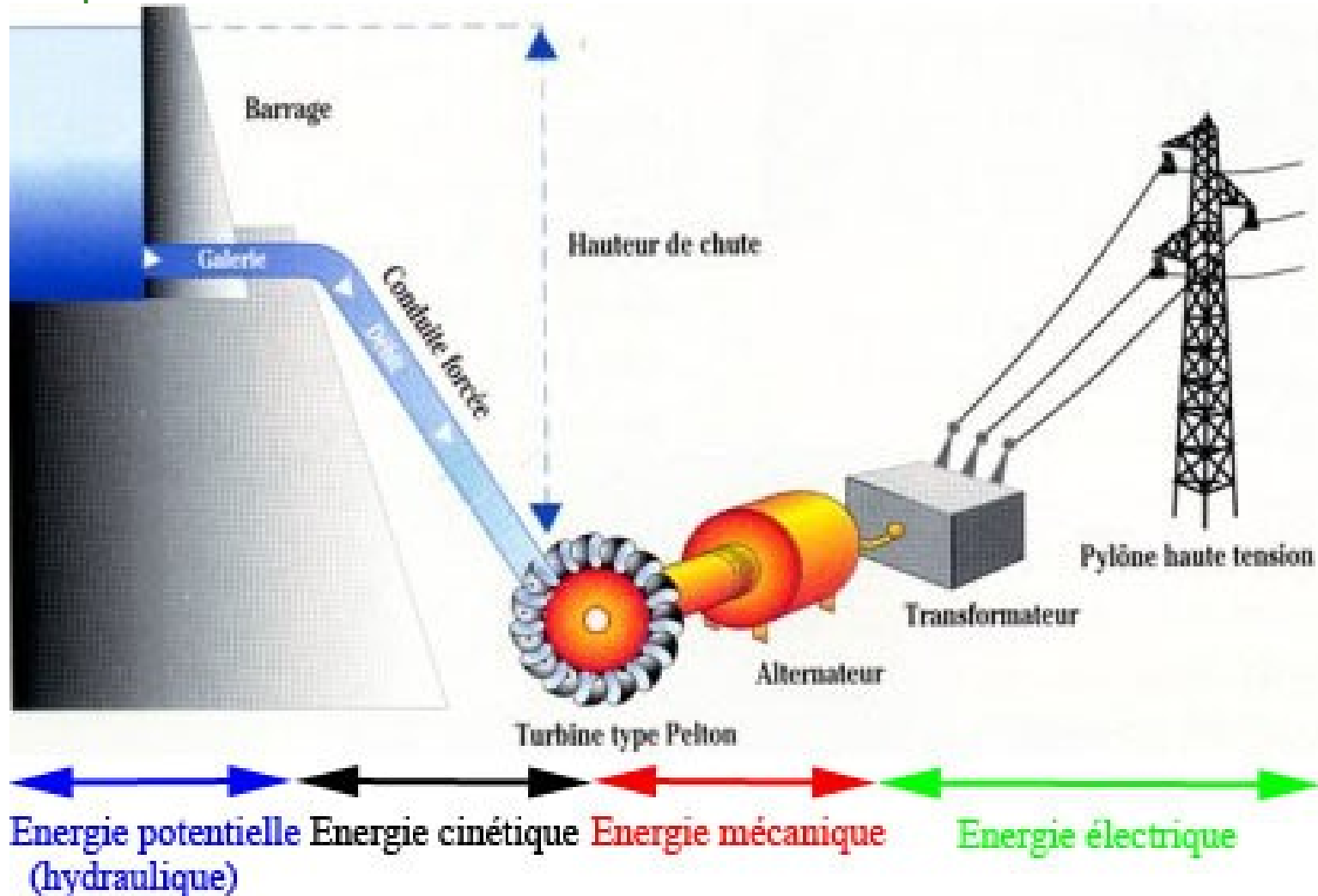
- Ce mouvement peut être utilisé:
 - Directement: lorsque la consommation finale est une énergie mécanique;
 - Indirectement: après conversion, lorsque la consommation finale est une énergie autre que mécanique, par exemple, l'électricité.
 - Dans ce cas, la conversion se fait au sein d'une centrale hydroélectrique.

Centrales hydroélectriques

- L'énergie hydraulique est une énergie:
 - cinétique dans le cas des
 - marées : vagues, courants marins, etc.
 - cours d'eau: rivières, ruisseaux, etc.
 - potentielle dans le cas des chutes: barrages.
- La centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute et du débit d'un cours d'eau.

Centrales hydroélectriques:

Principe de fonctionnement



Centrales hydroélectriques:

Principe de fonctionnement

- Il s'agit de capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité.
- L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice.
- L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie cinétique puis en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

Centrales hydroélectriques:

Principe de fonctionnement

- La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :
 - hauteur de la chute;
 - débit de la chute;
- La définition de l'énergie potentielle est :

$$W = m \cdot g \cdot h$$

W : énergie potentielle en joules (J);

m : masse de l'eau en kilogrammes (kg);

g : accélération de la pesanteur en mètres/secondes² (m/s²) ou Newton/Kilogrammes (N/Kg) (g = 9,81)

h: hauteur de la chute d'eau en mètres(m).

Centrales hydroélectriques:

Principe de fonctionnement

- La définition de la puissance est :

$$P_p = dW / dt$$

Avec :

P_p : puissance utile de la chute d'eau en Watt, (W)

dt : durée en secondes (s)

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit :

$$P_p = d(m.g.h) / dt$$

Centrales hydroélectriques:

Principe de fonctionnement

Or : $m = \rho.V$

Avec :

ρ : masse volumique en kilogrammes/mètres³, (kg/m³)

V : volume en mètres³, (m³)

Donc : $P_p = d(\rho.V.g.h)/dt$

Et : $Q = dV/dt$

Avec :

Q : débit de la chute d'eau en mètres³/secondes, (m³/s)

Centrales hydroélectriques:

Principe de fonctionnement

Ce qui donne : $P_p = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h$

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit $Q \cdot h$ doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies. Les termes ρ et g étant constants.

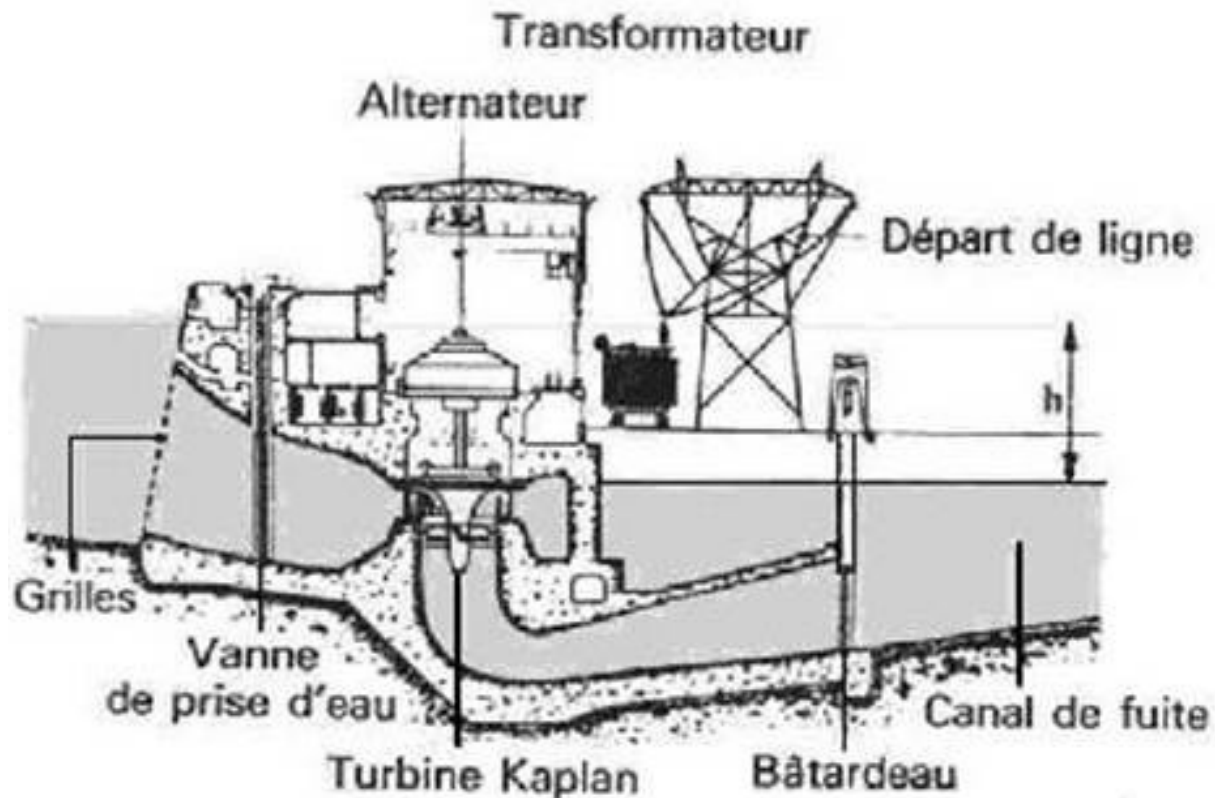
Remarque : La masse volumique de l'eau est 1, donc 1 m³ correspond à une masse de 1000 kg. On obtient alors une expression de P_p en kiloWatt (kW) :

$$P_p = Q \cdot g \cdot h$$

Centrales hydroélectriques:

Types

Les centrales hydrauliques basses chutes (ou au fil de l'eau)



Centrales hydroélectriques:

Types

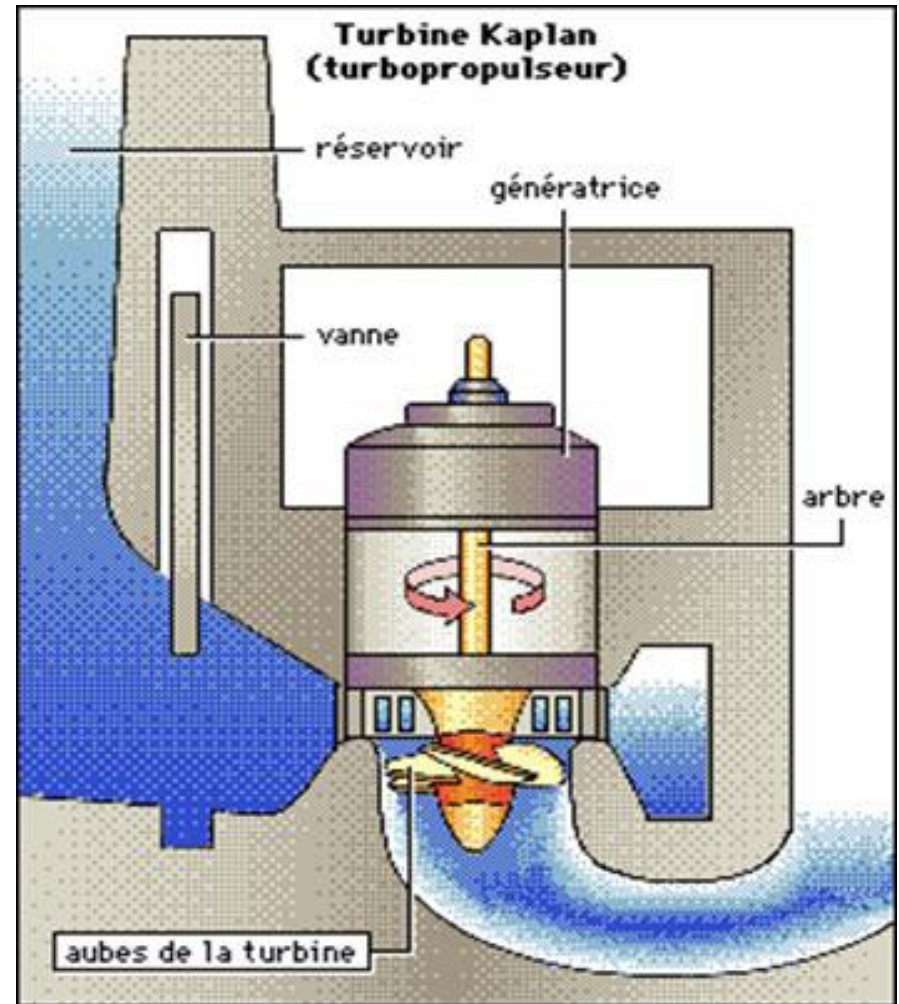
Elles sont caractérisées par un débit très important mais avec une faible hauteur de chute.

Les centrales de basse chute, se trouvent sur les grands fleuves et fonctionnent au fil de l'eau et produisent sans interruption.

Centrales hydroélectriques:

Types

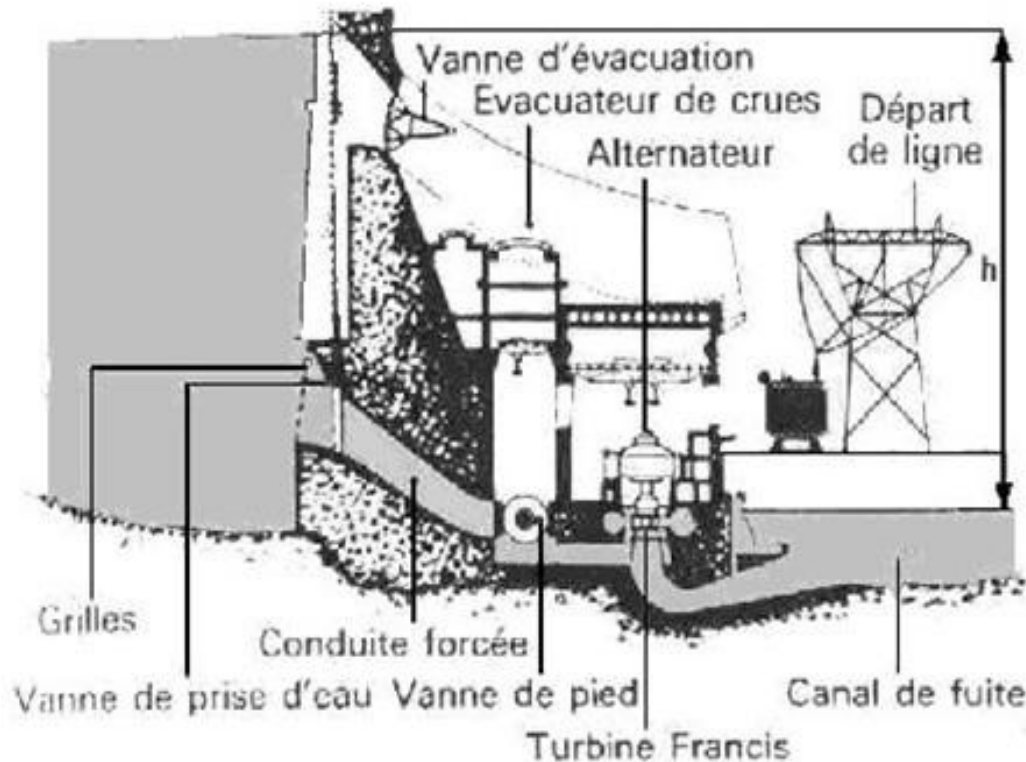
Les usines de basse chute sont équipés de turbine à réactions type Kaplan avec des pales qui s'orientent en fonction du débit.



Centrales hydroélectriques:

Types

Les centrales hydrauliques moyennes chutes



Centrales hydroélectriques:

Types

Les centrales de moyennes chutes sont caractérisées par une hauteur de chute comprise entre 30 et 200m. L'usine se situe généralement au pied du barrage.

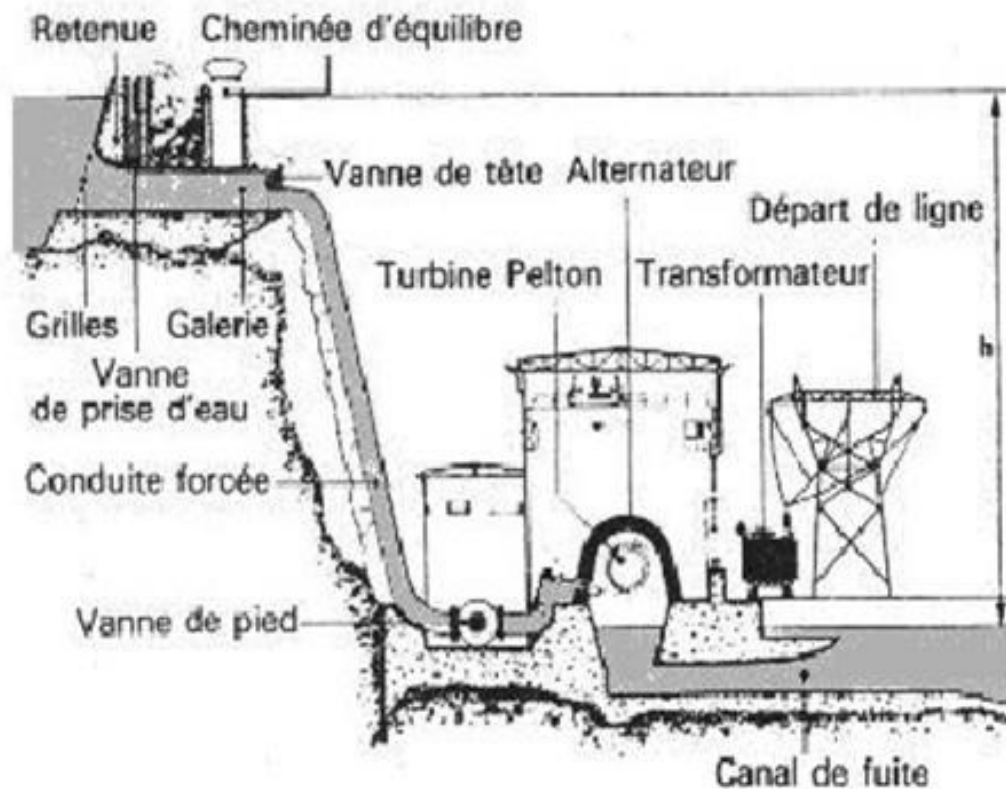
Ce sont souvent des usines de retenues. Elles se trouvent en moyenne montagne, elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur de courtes périodes.

Ces centrales d'éclusée servent pour la régulation journalière ou hebdomadaire de la production.

Centrales hydroélectriques:

Types

Les centrales hydrauliques hautes chutes



Centrales hydroélectriques:

Types

Les centrales de hautes chutes sont caractérisées par une forte hauteur de chute $h > 200$ m. L'usine est toujours située à une distance importante de la prise d'eau parfois plusieurs kilomètres.

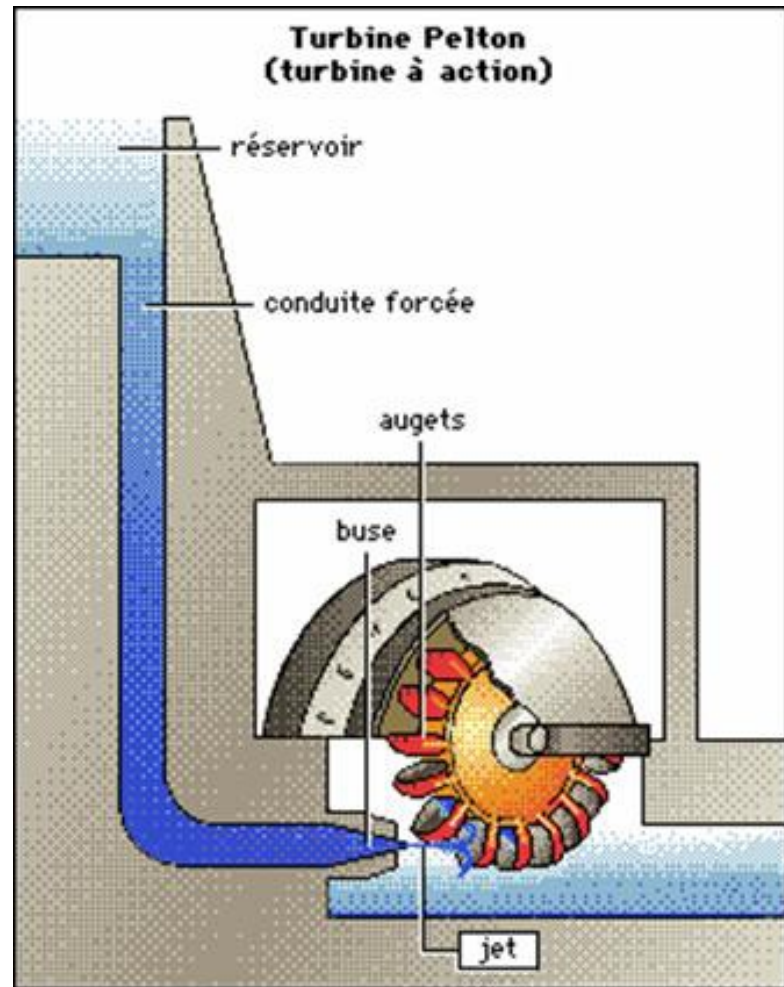
Elles se trouvent en altitude, les usines de lacs disposent de plus de 400 heures de réserves.

Leur rapidité de démarrage permet de répondre au besoin de consommation, notamment en hiver.

Centrales hydroélectriques:

Types

Les usines de haute chute sont généralement équipés de turbines Pelton : l'eau arrive en jets à la roue équipée de pales en forme de godets.



Centrales hydroélectriques:

Types

Remarque : Le rapport moyen Puissance électrique / Puissance Potentielle de la chute d'eau est en moyenne d'environ 0.7.

Le rendement est ainsi de 70%.

La puissance électrique $P_e = 0.7P_p \Leftrightarrow P_e = 7.Q.h$
(0.7g = 7)

Avec :

P_e : Puissance électrique injectée au réseau en kiloWatt (kW) ou en kiloVoltAmpère (kVA).

Centrales hydroélectriques:

Types

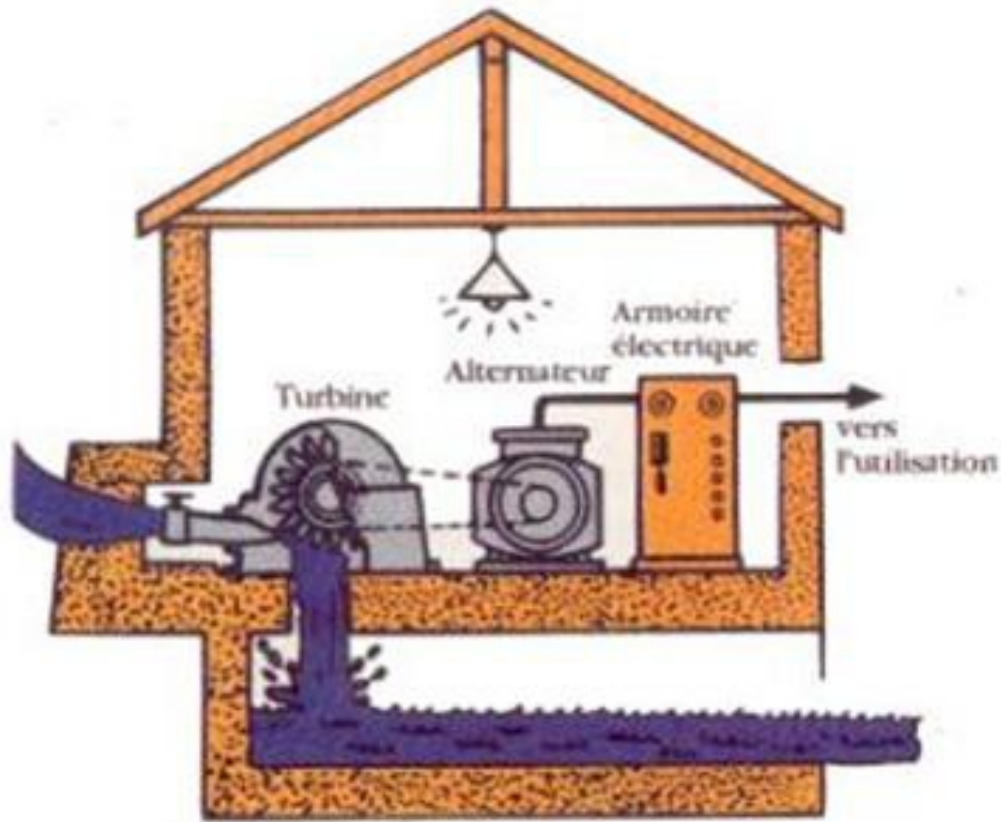
Plus généralement d'après le rendement η caractéristique de la centrale (plus particulièrement du couple turbine - alternateur inscrit par le fabricant) on a :

$$P_e = \eta \cdot g \cdot Q \cdot h$$

Centrales hydroélectriques:

Types

Les micros centrales hydrauliques



Centrales hydroélectriques:

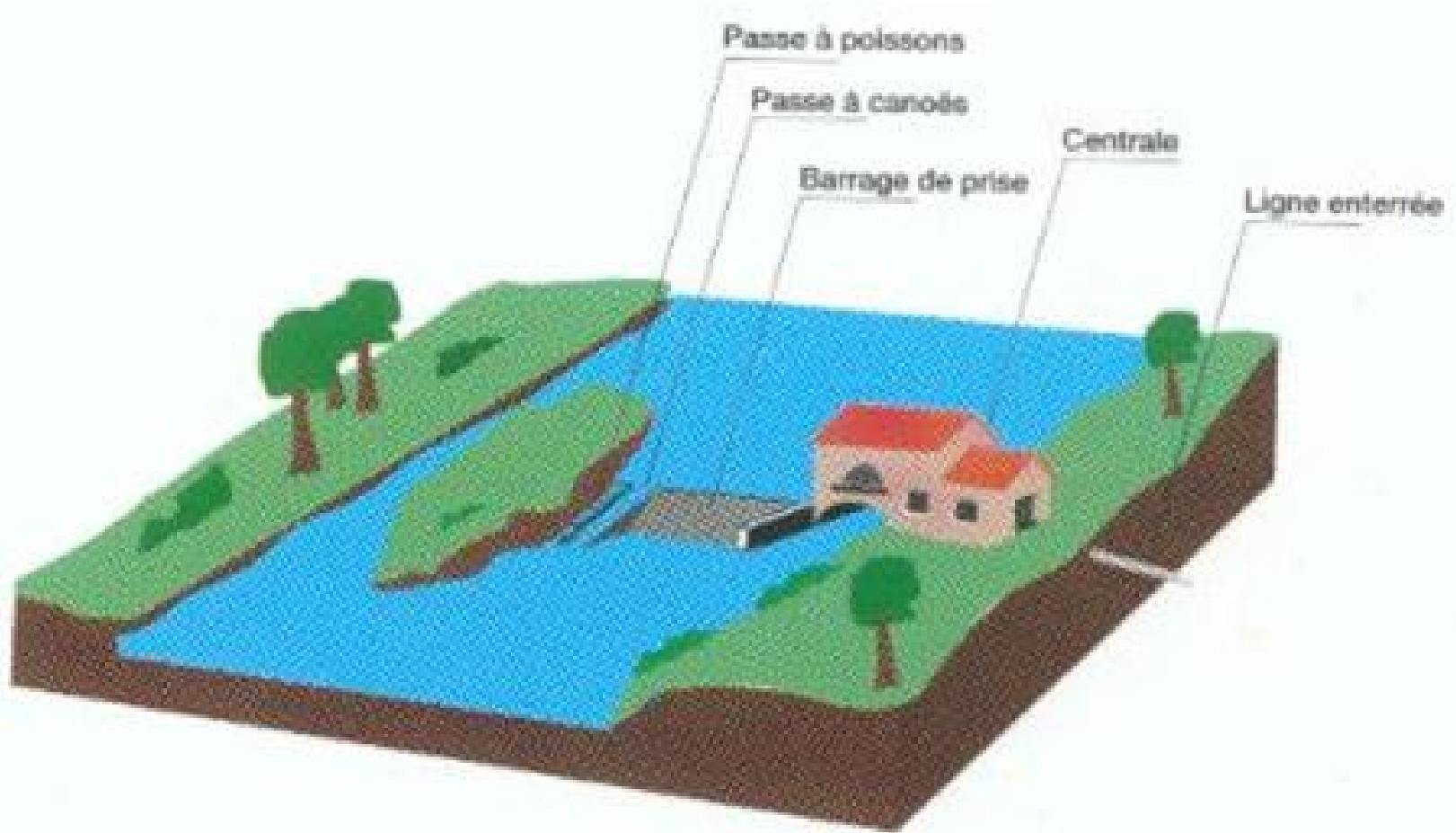
Types

Le principe est identique mais en miniature et pour des particuliers. L'électricité produite est directement utilisée ou stockée dans des accumulateurs ou alors elle peut être revendue à un réseau électrique.

Il n'y a pas d'énormes barrages : poissons et canoéistes peuvent circuler librement grâce aux dispositions prises par les exploitants.

Centrales hydroélectriques:

Types



Centrales hydroélectriques:

Types

La qualité de l'eau est préservée : au maximum 10 % du débit d'eau est turbiné, les propriétés physico-chimiques de l'eau étant ainsi conservées. Certains exploitants vont même jusqu'à dépolluer les rivières (poubelles des riverains, pneus, plastiques...).

Centrales hydroélectriques:

Types



Centrales hydroélectriques:

Rentabilité/Coût

Investir à l'échelle d'un particulier, pour être rentable, une telle installation doit faire au moins 10 kW.

■ **Que peut on faire avec 10 kW ?**

- ❑ Chauffer un volume de 300 à 500 m³;
- ❑ Alimenter 100 ampoules de 100W;
- ❑ Faire fonctionner simultanément 10 fers à repasser;
- ❑ Produire 2500 litres d'eau chaude en 8 heures; Etc.

Cette puissance convient très bien à une résidence principale, chauffage et climatisation compris.

Centrales hydroélectriques:

Rôle régulateur

L'électricité ne peut être stockée à l'échelle industrielle, il faut donc constamment adapter la production à la demande, qui est aléatoire. Contrairement aux centrales thermiques, les turbines hydroélectriques peuvent démarrer en quelques minutes. Grâce à leur souplesse d'exploitation, les usines hydrauliques permettent de faire face dans un délai très court, aux variations de la consommation. Elles interviennent alors dans la régulation de la fourniture de l'énergie.

Centrales hydroélectriques:

Rôle régulateur

Certaines d'entre elles sont utilisées pour fournir de l'électricité aux heures de pointe, ou pendant les jours d'hiver les plus froids.

Exemple : Deux minutes suffisent à certaines usines pour fournir plus de 1GW.

Centrales hydroélectriques:

Avantages

- Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenu. Ce procédé permet de stocker l'énergie électrique en surplus du réseau en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau.
- Démarrage et arrêt des centrales très rapides.
- Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.
- Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).
- Facilité d'entretien et faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modérée.
- Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.
- Souplesse d'exploitation, permettant d'accroître encore les progrès de l'automatisme et des télécommandes.

Centrales hydroélectriques:

Inconvénients

- Modification du débit et du niveau de l'eau.
- Perturbation de la faune et de la flore.
- Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.
- Risque pour les personnes en aval lié au barrage.

Centrales hydroélectriques:

Turbines

- Les centrales hydroélectriques peuvent être équipées de différents types de turbines, on trouve:
 - Francis;
 - Pelton;
 - Kaplan;

Centrales hydroélectriques:

Turbine Francis

Une **turbine Francis** est une turbine hydraulique de type à réaction, car la partie mobile provoque une différence de pression entre l'entrée et la sortie . Elle est adaptée pour des hauteurs de chute relativement faibles (entre 20 et 350 mètres), pour des puissances et débits moyens (de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts avec des débits jusqu'à 30 000 l/s).

Centrales hydroélectriques:

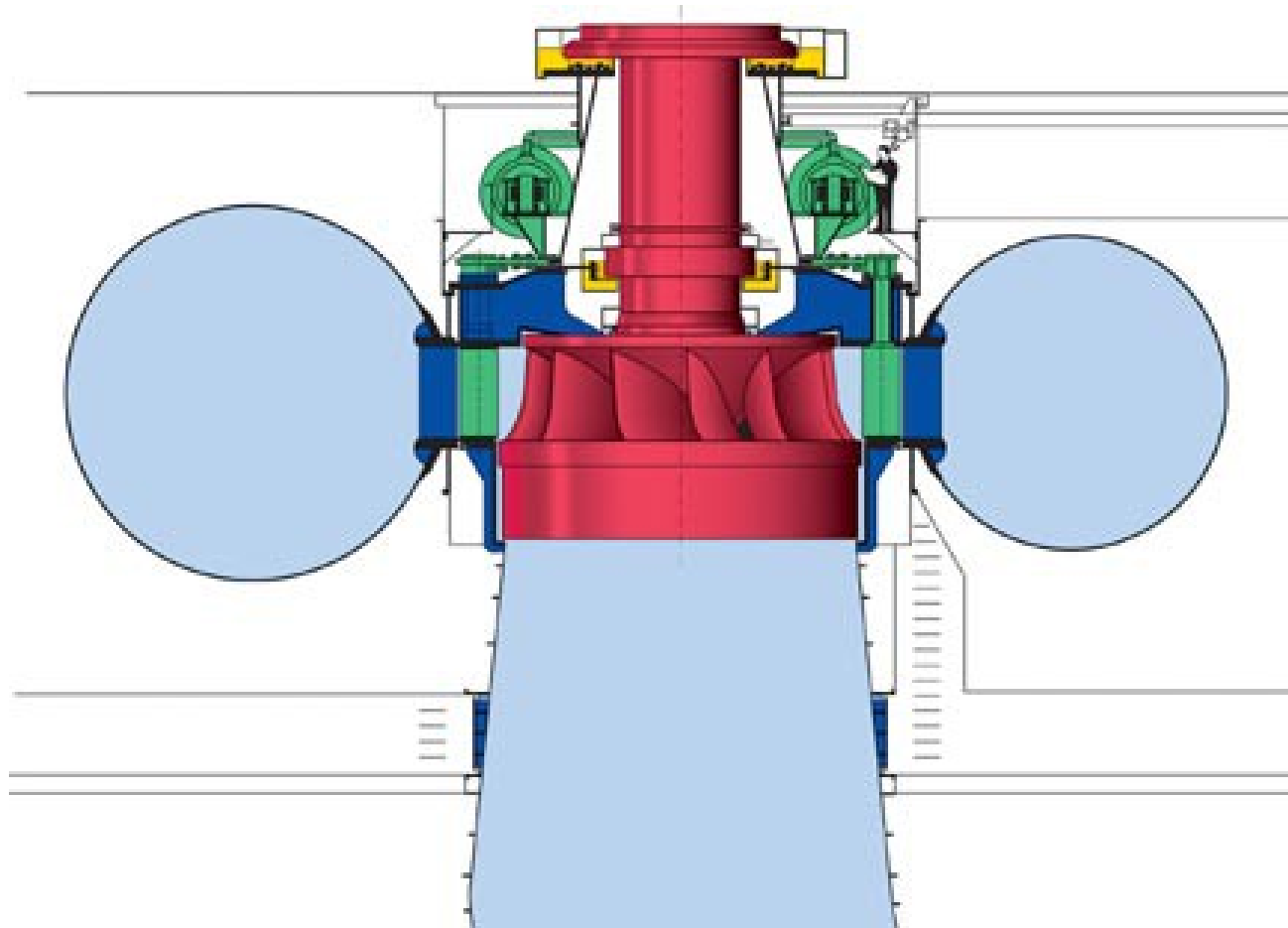
Turbine Francis

■ **Caractéristiques**

- ❑ Le diamètre de la roue varie de quelques décimètres jusqu'à environ 10 mètres.
- ❑ Vitesse de rotation : entre 70 et 1000 tr/min.
- ❑ Elle a un rendement qui varie de 80% à 95%.

Centrales hydroélectriques:

Turbine Francis



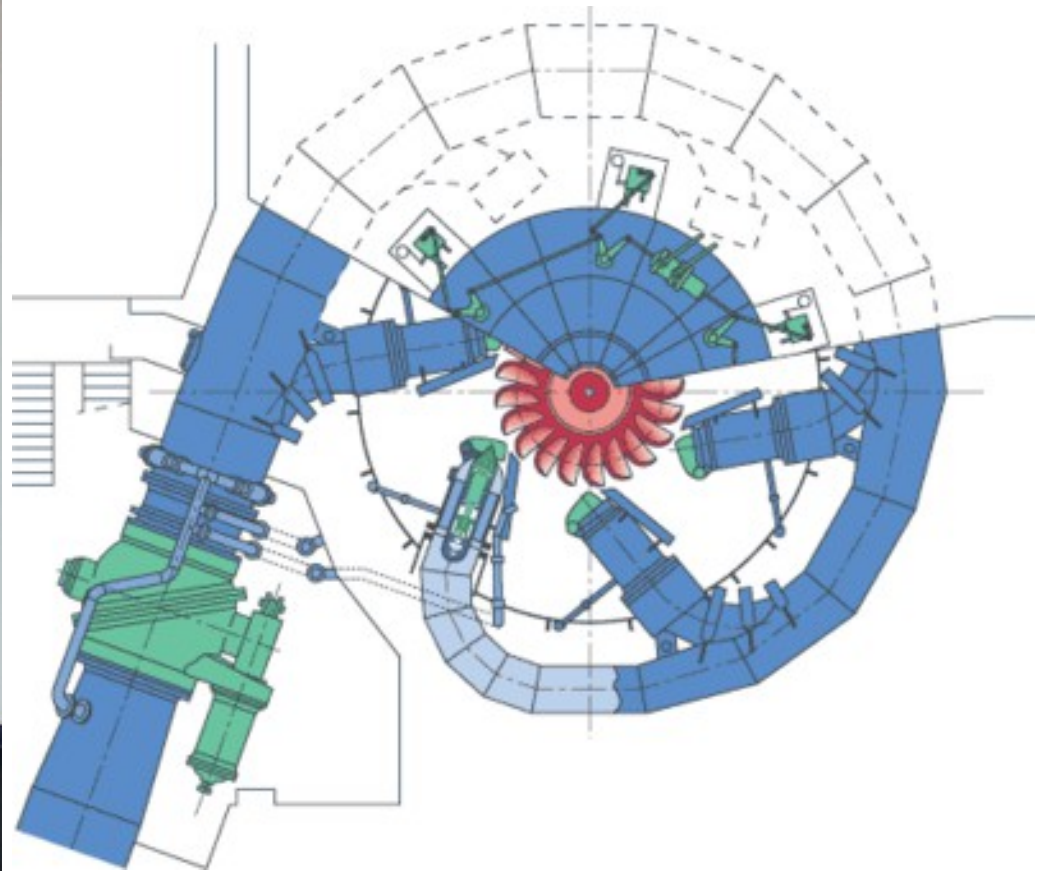
Centrales hydroélectriques:

Turbine Pelton

- Une **turbine Pelton** est un type de turbine hydraulique utilisée dans les centrales hydroélectriques.
- Cette turbine est du type « à action » car l'énergie potentielle de l'eau venant d'une conduite forcée est transformée en énergie cinétique, par l'action d'un jet d'eau sur les augets de la roue.

Centrales hydroélectriques:

Turbine Pelton



Centrales hydroélectriques:

Turbine Pelton

- Ce type de turbine ne dispose pas de diffuseur (ou aspirateur) en sortie d'eau, car celle-ci s'écoule librement à la pression atmosphérique. D'après le calcul de la vitesse spécifique, ces turbines sont adaptées à des chutes dites « hautes chutes », > à 400 m avec un faible débit d'eau (< 15 m³/s).
- La vitesse d'eau en sortie de l'injecteur répond à la formule:

$$V_i = \sqrt{2gH}$$

Centrales hydroélectriques:

Turbine Pelton

- La vitesse de rotation V_r de la roue doit être égale à la moitié de la vitesse de l'eau à la sortie de l'injecteur, de manière à optimiser le rendement:

$$V_r = \frac{V_i}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{2gH}$$

- De cette manière, l'énergie cinétique de l'eau est entièrement transmise à la roue, la vitesse de l'eau devenant quasiment nulle au creux des augets.

Centrales hydroélectriques:

Turbine Pelton

- Cette conception permet un rendement exceptionnel de l'ordre de 90%. Le rendement théorique en fonction de la vitesse peut s'écrire:

$$\eta = \frac{4V_r(V_i - V_r)}{V_i^2}$$

Centrales hydroélectriques:

Turbine Kaplan

- Une **turbine Kaplan** est une turbine hydraulique à hélices de type propulsion. Elle a été inventée en 1912 par l'ingénieur Viktor Kaplan.
- **Caractéristiques**
 - Elle est adaptée pour les faibles chutes de 10 à 30 mètres en hauteur, et pour les très grands débits de 5000 à 100000 l/s.
 - La vitesse de rotation varie de 50 à 250 tr/min.

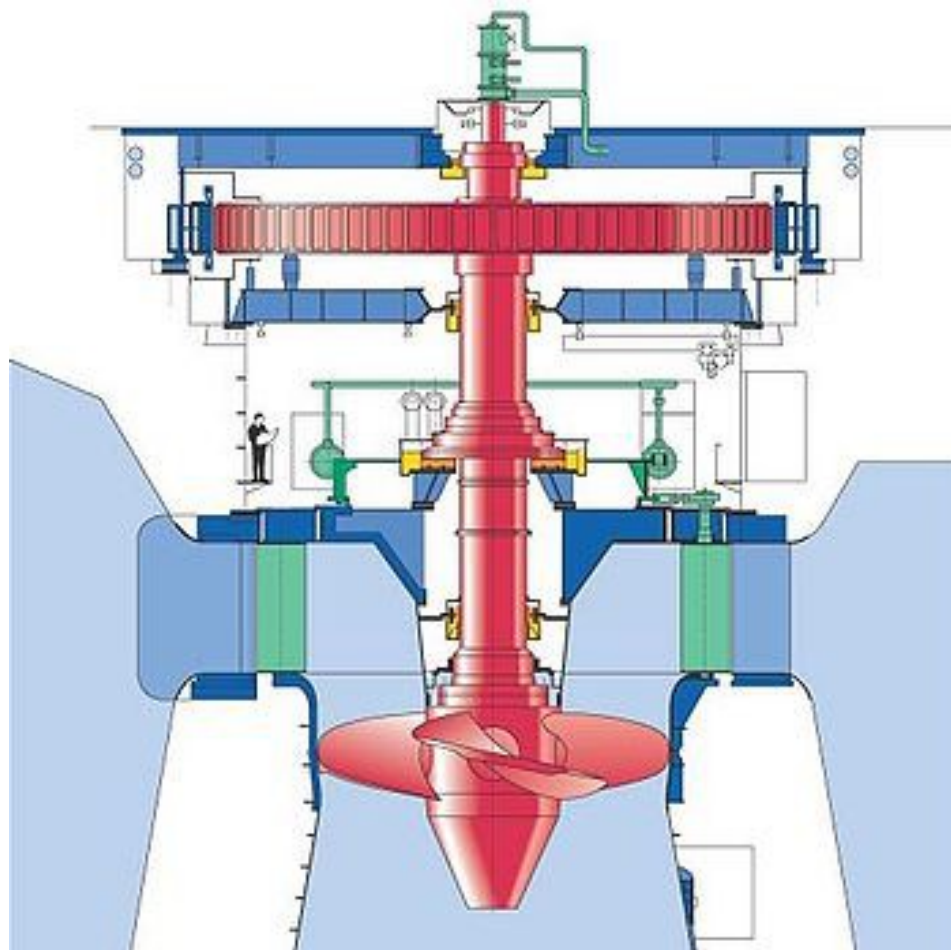
Centrales hydroélectriques:

Turbine Kaplan

- La turbine Kaplan se différencie des autres turbines à hélices par ses pales dont on peut faire varier l'angle en opération. Cela lui permet d'avoir un rendement élevé pour plusieurs conditions de débit d'eau.
- Son rendement varie normalement entre 90% et 95%.
- Les turbines Kaplan conviennent particulièrement aux faibles hauteurs de chute et forts débits.

Centrales hydroélectriques:

Turbine Kaplan



Centrales hydroélectriques:

Rendement

- Le rendement global η_{TA} d'un couple turbine-alternateur est le produit des rendements $\eta_{Turbine}$ et $\eta_{Alternateur}$:

$$\eta_{TA} = \eta_{Turbine} * \eta_{Alternateur}$$

- Sachant que la plupart des alternateurs possèdent un rendement élevé ($> 90\%$), le rendement global des centrales hydroélectriques est meilleurs vis-à-vis des autres centrales.

Centrales hydroélectriques:

Rendement

- La raison:
 - Le cycle de transformation de l'énergie primaire en énergie électrique est court;
 - La consommation propre de la centrale est très faible en comparaison aux centrales thermiques;
 - Le démarrage rapide (quelques minutes);
- Exemple: Turbine Kaplan – $90\% < \eta_{\text{Turbine}} < 95\%$

$$90\% < \eta_{\text{Alternateur}} < 95\%$$

$$81\% < \eta_{\text{TA}} < 90,25\%$$