
Analyse énergétique des centrales électriques

Filière Ingénieur Électronique,
Électrotechnique et Automatique.

Centrales thermiques

- L'énergie présente sous une forme quelconque peut être transformée en une autre forme à l'aide de machines.
- Les différentes machines peuvent être classées selon:
 - Le sens de la conversion de l'énergie qu'elles génèrent;
 - Machines réceptrices;
 - Mécanique → thermique – cinétique – potentielle – etc.
 - Machines motrices : transformation inverse.

Centrales thermiques

- Les différentes machines peuvent être classées selon:
 - Le fluide qui les traverse:
 - Gaz (compresseurs, ventilateurs, turbines à gaz, etc.);
 - Liquide (pompes, turbines hydrauliques).
 - La façon dont elles sont associées entre elles:
 - Turbo réacteurs associent turbine à gaz et une tuyère ;
 - Turbo compresseur associent turbine à gaz à un compresseur ;
 - Etc.
-

Centrales thermiques

- Les différentes machines peuvent être classées selon:
 - Le mouvement du fluide: l'écoulement du fluide au travers des organes de la turbomachine peut être stationnaire ou instationnaire;
 - Le mouvement des organes mécaniques: alternatif ou rotatif.
-

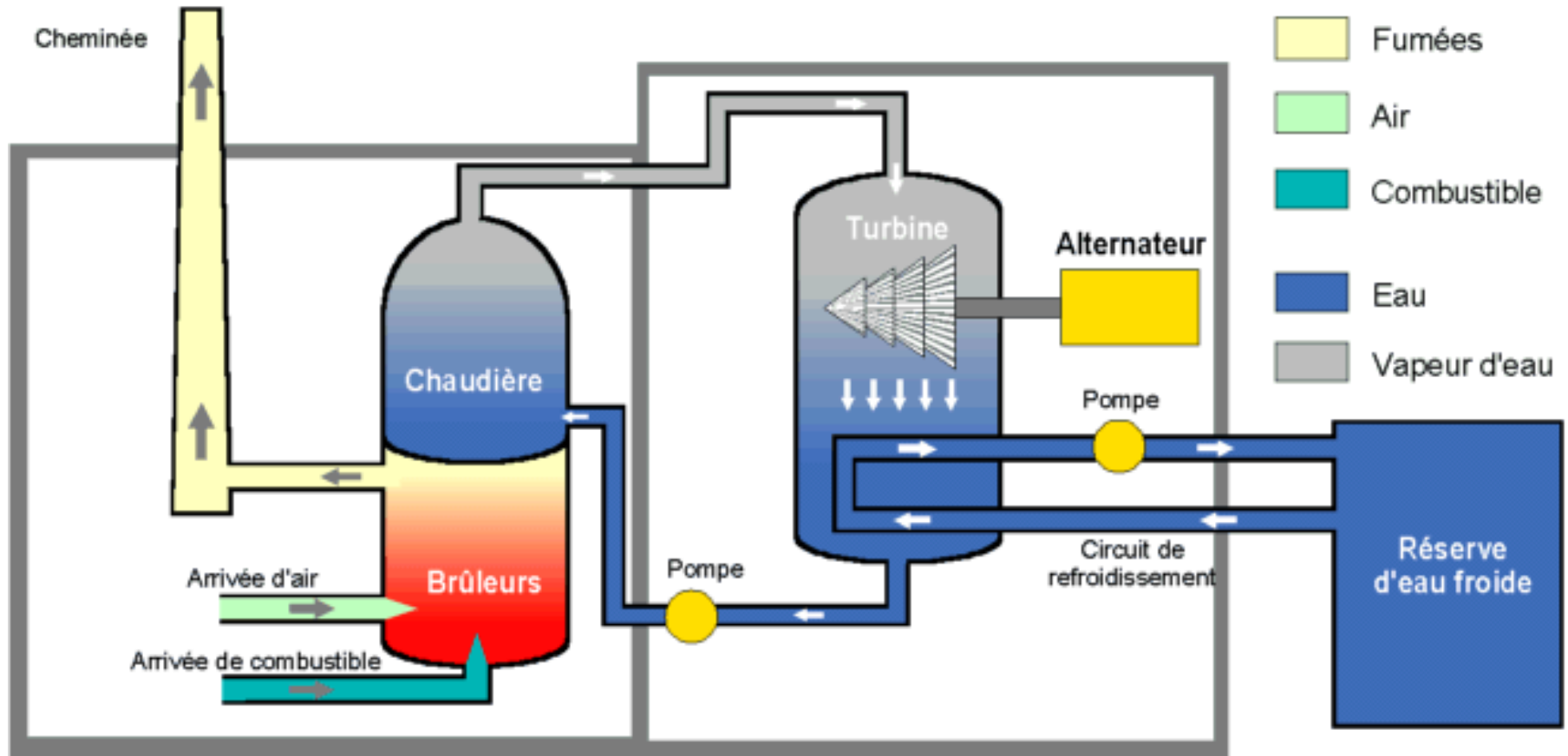
Centrales thermiques

- L'énergie chimique du combustible et de l'air est transformée, par combustion, en chaleur (énergie thermique) au sein d'une chaudière.
 - Cette chaleur fait tourner une turbine à vapeur et se transforme en énergie mécanique.
 - La turbine peut, à son tour, entraîner une génératrice et produire de l'énergie électrique.
-

Centrales thermiques

- Dans ce cas, la chaudière, la turbine et la génératrice sont les machines qui effectuent la transformation de l'énergie.
 - L'énergie électrique peut servir, à son tour, à des fins multiples:
 - Faire tourner les moteurs d'une usine (énergie mécanique);
 - Chauffer les locaux (énergie thermique);
 - Décomposer certains minerais (énergie chimique).
-

Centrales thermiques



Centrales thermiques

Principe de la conservation de l'énergie

Chaque fois que l'énergie passe d'une forme à une autre, la quantité d'énergie totale après transformation reste la même.

L'énergie se transforme tout simplement: elle ne peut être ni créée ni détruite.

Centrales thermiques

Principe de la conservation de l'énergie

Cependant, quand on passe d'une forme d'énergie à une autre, au moyen d'une machine quelconque, toute l'énergie recueillie n'est pas toujours utilisable pratiquement.

Centrales thermiques

Principe de la conservation de l'énergie

Par exemple, l'énergie thermique produite par un moteur d'automobile servira en grande partie à chauffer inutilement les fumées évacuée dans l'atmosphère.

Centrales thermiques

Principe de la conservation de l'énergie

De plus une partie de l'énergie mécanique développée par le moteur est dépensée pour vaincre la résistance de l'air et les divers frottements.

L'énergie utile est alors inférieure à l'énergie fournie.

Centrales thermiques

Notions de chaleur et de température

Lorsqu'on fournit de l'énergie thermique à un corps, on lui fournit de la chaleur. Ce qui provoque l'augmentation de sa température.

De même, tout corps, dont la température augmente est le siège d'une agitation thermique de ses molécules et/ou atomes.

La température s'exprime en Kelvin (K), Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou en Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$).

Centrales thermiques

Chaleur requise pour chauffer un corps

L'augmentation de température d'un corps dépend de la chaleur qu'il reçoit, du matériau dont il est constitué et de sa masse.

La relation est :

$$Q = m.c.\Delta$$

Q : quantité de chaleur en joules (J);

m : masse du corps en kilogrammes (kg);

c : chaleur massique du corps en J/(kg.°C);

Δ : variation de la température en K en °C.

Centrales thermiques

Chaleur requise pour chauffer un corps

Exemple:

Calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de 200 litres d'eau de 10°C à 70°C.

On considère le réservoir parfaitement isolé.

La chaleur massique de l'eau est: 4180 J/(kg.°C).

La masse volumique de l'eau est 1kg/l (1000 kg/m³).

$$Q = mc\Delta T = 200.4180.(70-10) = 50,2 \text{ MJ.}$$

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- Une machine thermique est un dispositif dans lequel un fluide décrit un cycle de transformation.
 - Une machine thermique ditherme échange de l'énergie, par transfert thermique, avec deux sources de chaleur.
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

Il existe **deux types de machines thermiques**:

□ celles qui font la conversion de chaleur en travail qu'on appelle **machines motrices** ($W < 0$)

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

Il existe **deux types de machines thermiques**:

❑ celles qui transfèrent de la chaleur d'une source froide vers une source chaude:

- ❑ qu'on appelle **appareils frigorifiques** si le but recherché est de refroidir ou de maintenir froide une source froide,
 - ❑ qu'on appelle **pompes à chaleur** si le but recherché est de réchauffer ou de maintenir chaude une source chaude.
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- Au cours d'un cycle dont, la durée dt est brève, le fluide échange un travail dW , une quantité de chaleur dQ_1 lorsqu'il est en contact avec la source chaude à température T_1 , une quantité de chaleur dQ_2 lorsqu'il est en contact avec la source froide à température T_2 .
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- La puissance échangée est:

$$P = \frac{\delta W}{dt}$$

- Les flux de chaleur échangés avec les sources chaude et froide sont:

$$\varphi_1 = \frac{\delta Q_1}{dt} \quad \text{et} \quad \varphi_2 = \frac{\delta Q_2}{dt}$$

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Énoncé de Thomson (Lord Kelvin)

" Un système en contact avec une seule source de chaleur ne peut, au cours d'un cycle, que recevoir du travail et fournir de la chaleur " .

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- **Énoncé de Thomson (Lord Kelvin)**
- Premier et second principes de la thermodynamique sur un cycle pour une machine ditherme:

$$0 = \delta W + \delta Q_1 + \delta Q_2 \quad \text{et} \quad 0 = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} + \delta S_c$$

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Énoncé de Thomson (Lord Kelvin)

■ Premier et second principes de la thermodynamique sur un cycle pour une machine ditherme:

- δS_c est **positif** s'il existe des transformations irréversibles, **nul** si toutes les transformations sont réversibles.
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- **Énoncé de Thomson (Lord Kelvin)**
 - Premier et second principes de la thermodynamique sur un cycle pour une machine ditherme:
 - Dans le cas où **toutes les transformations sont réversibles**, les cycles dithermes sont appelés **cycles de Carnot**.
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- Lorsque le fluide est en contact thermique avec l'une des sources, sa transformation ne peut être qu'isotherme à la température de la source.
- L'évolution réversible de la température de l'une des sources à la température de l'autre ne peut, pour le fluide, se faire que par une transformation adiabatique puisqu'on ne dispose que de ces deux seules sources de chaleur.

Un cycle de Carnot est constitué de deux transformations isothermes et de deux transformations adiabatiques.

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Cas des moteurs

- ❑ On peut produire du travail à partir de deux sources de chaleur.
 - ❑ Le fluide reçoit de la chaleur de la source chaude et en rend une partie à la source froide.
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

La puissance mécanique que peut fournir une turbine à vapeur dépend, non seulement, de la chaleur qu'elle reçoit, mais aussi de la température d'entrée T_1 et de la température de sortie T_2 de la vapeur.

La source chaude est obtenue, sauf exception, par réaction chimique (combustion) ou réaction nucléaire et a, donc, un coût.

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

Le travail est soit facturé sous forme électrique lorsqu'il est transformé en électricité par le turbo-alternateur à la centrale soit compté, par exemple, dans le coût des transports.

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

□ Pour un moteur ditherme :

on appelle rendement d'un moteur le rapport r du travail produit à la quantité de chaleur reçue.

$$r = \frac{-\delta W}{\delta Q_1} = 1 + \frac{\delta Q_2}{\delta Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_2 \delta S_c}{\delta Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1} = r_c$$

Pour un moteur fonctionnant suivant un cycle de Carnot, δS_c est nul et le rendement est r_c .

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

□ Pour un moteur ditherme :

Théorème de Carnot :

- Le rendement d'un moteur fonctionnant suivant un cycle de Carnot ne dépend que des températures des sources, il est indépendant du fluide et des organes le constituant
 - Le rendement d'un moteur fonctionnant suivant un cycle de Carnot est maximal.
-

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

□ Pour un moteur ditherme :

En effet le rendement maximal d'une turbine à vapeur est donné par l'équation de Carnot:

$$\eta = 1 - T_2/T_1$$

η : rendement en %;

T_1 : température absolue de la valeur à l'entrée de la turbine (K);

T_2 : température absolue de la valeur à la sortie de la turbine (K);

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

□ Pour un moteur ditherme :

Afin d'obtenir le maximum d'énergie mécanique pour une quantité de chaleur (joules) donnée, on cherche à augmenter la température T_1 et à diminuer la température T_2 .

La température minimale T_2 est imposée par la température ambiante, située habituellement au voisinage de 20°C , 297K .

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

■ Rendement d'une turbine à vapeur

□ Pour un moteur ditherme :

La température maximale T_1 est limitée par la résistance des matériaux aux hautes températures et aux hautes pressions.

Dans les turbines modernes, cette température est d'environ 500°C , soit 773K , ce qui permet un rendement théorique maximal de :

$$\eta = 1 - 293/773 = 62\%$$

Centrales thermiques

Fonctionnement des machines thermiques dithermes

- **Rendement d'une turbine à vapeur**

- **Pour un moteur ditherme :**

Tous les moteurs thermiques convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique sont limités par le rendement théorique maximal.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

Lorsque l'on caractérise les performances d'une chaudière, il faut distinguer le rendement de la chaudière lorsque le brûleur est en fonctionnement, c'est le **rendement nominal ou utile** et le rendement global sur toute la saison de chauffe, c'est le **rendement saisonnier**. Ce dernier prend en compte non seulement les performances pendant les périodes de marche, mais aussi pendant les périodes d'arrêt du brûleur.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Rendement nominal ou rendement utile

Le **rendement utile** η_{utile} d'une chaudière est son rendement instantané lorsque le brûleur fonctionne. C'est le rapport entre la puissance thermique ***Pu*** transmise à l'eau de chauffage et la puissance ***Pa*** contenue dans le combustible :

$$\eta_{\text{utile}} = \mathbf{Pu/Pa}$$

où

P_a = puissance contenue dans le combustible = débit de combustible x son pouvoir calorifique PCI (ou PCS);

P_u = puissance utile de la chaudière ou puissance fournie à l'eau de chauffage.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

□ Rendement nominal ou rendement utile

Il s'agit d'un rendement instantané qui peut varier en fonction des conditions d'exploitation de la chaudière (température de l'eau, puissance du brûleur par rapport à la puissance de la chaudière).

Les fabricants de chaudières doivent pouvoir fournir sa valeur à charge nominale et dans des conditions de combustion idéales (rendement nominal) dans leur documentation technique.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

□ Rendement nominal ou rendement utile

La différence entre la puissance utile fournie à l'eau (P_u) et la puissance contenue dans le combustible est constituée de pertes :

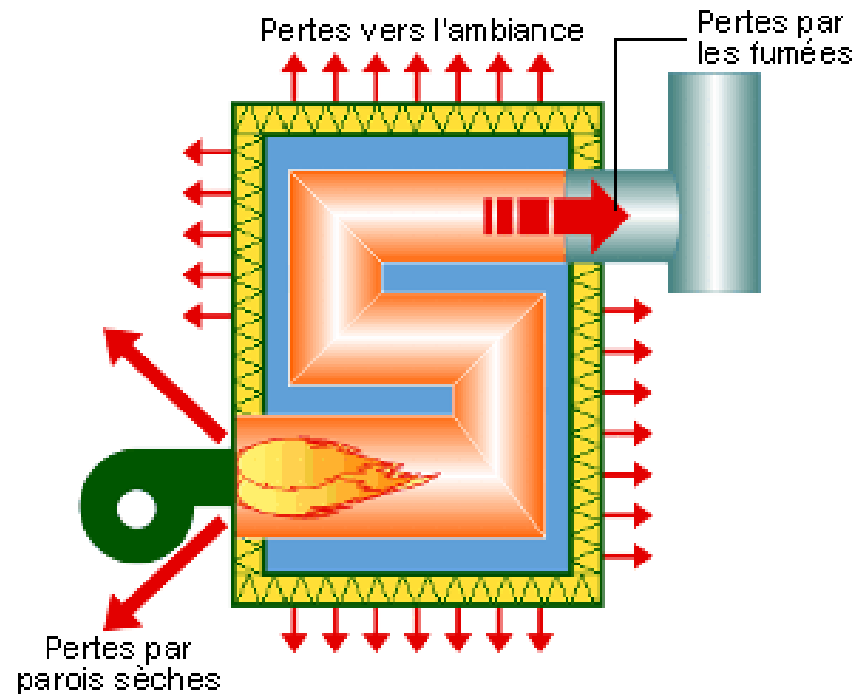
□ *Vers la cheminée.* Les fumées de combustion sont évacuées encore chaudes. Cette chaleur est perdue.

□ *Vers la chaufferie.* La chaudière est comme un gros radiateur qui émet de la chaleur vers l'ambiance de la chaufferie.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Rendement nominal ou rendement utile



Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

□ Rendement nominal ou rendement utile

Le rendement utile d'une chaudière peut donc s'exprimer sous la forme :

$$\eta_{\text{utile}} = (P_a - \text{Pertes fumées} - \text{Pertes ambiance}) / P_a$$

En pratique, on utilise souvent la forme :

$$\eta_{\text{utile}} = \eta_{\text{comb}} - \%q_r$$

où

η_{comb} = rendement de combustion [%]

$\%q_r$ = pourcentage de réduction due aux pertes vers l'ambiance durant le fonctionnement du brûleur.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

- **Pertes par les fumées et rendement de combustion**
 - Les pertes par les fumées proviennent :
 - De la chaleur sensible contenue dans les fumées qui sont nettement plus chaudes que l'air aspiré dans la chaufferie.
 - De la chaleur latente, si la vapeur d'eau contenue dans les fumées n'est pas entièrement condensée. Cette perte est prise en compte dans le rendement chiffré si on compare l'énergie fournie au Pouvoir Calorifique Supérieur.
-

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

- **Pertes par les fumées et rendement de combustion**
 - Les pertes par les fumées proviennent :
 - Des imbrûlés issus d'un mauvais mélange entre l'air et le combustible, provoquant la production de CO au lieu de CO₂ (la chaleur dégagée est alors inférieure à celle fournie par une combustion complète).
-

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes par les fumées et rendement de combustion

Le rendement de combustion se définit comme :

$$\eta_{\text{comb}} = (\text{Pa} - \text{Pertes fumées}) / \text{Pa}$$

où

Pa = puissance contenue dans le combustible = débit de combustible x PCI (ou PCS)

Le rendement de combustion est le plus souvent calculé par rapport au pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes par les fumées et rendement de combustion

Le rendement de combustion est l'image de la qualité de la combustion et de l'échange thermique entre les fumées et le fluide caloporteur.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes par les fumées et rendement de combustion

En pratique, on exprime souvent le rendement de combustion par la formule de Siegert :

$$\eta_{\text{comb}} = 100 - f \times (T_{\text{fumées}} - T_{\text{amb}}) / \% \text{CO}_2$$

où :

- $T_{\text{fumées}}$ = la température des fumées à la sortie de la chaudière [$^{\circ}\text{C}$];
- T_{amb} = température ambiante de la chaufferie [$^{\circ}\text{C}$];
- $\% \text{CO}_2$ = la teneur en CO_2 des fumées [%];
- f = facteur dépendant principalement du type de combustible (mazout : $f = 0,57$; gaz naturel : $f = 0,47$).

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes par les fumées et rendement de combustion

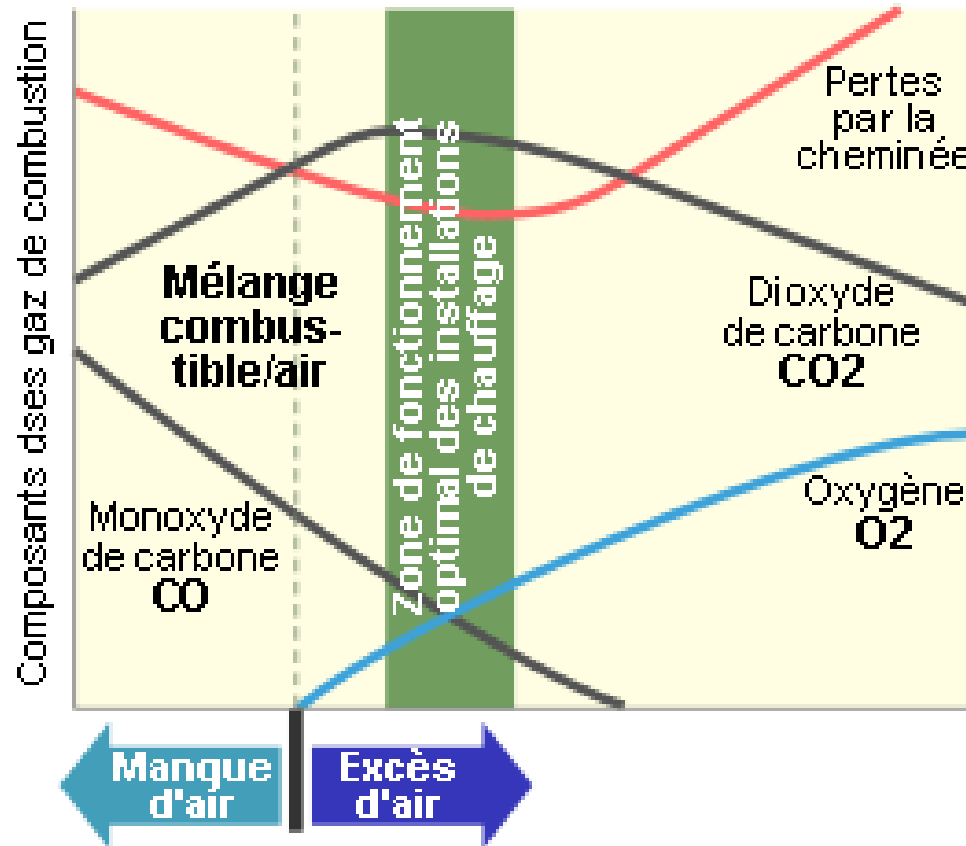
On relève les deux éléments clés de cette formule :

- La **température des fumées**, plus celle-ci est élevée, plus il y a de perte de chaleur vers la cheminée, et moins bon est l'échange entre l'eau et les fumées.
 - Le **pourcentage de CO₂** contenu dans les fumées qui symbolise la transformation complète du combustible.
-

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

- Évolution du contenu des fumées avec l'excès d'air [%] de combustion



Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes par l'ambiance

Les pertes vers l'ambiance proviennent de l'échange thermique par rayonnement et convection entre la chaudière et son environnement. Ces pertes proviennent d'une part de la masse d'eau chaude présente dans la chaudière et d'autre part des parties non irriguées de la chaudière qui s'échauffent directement sous le rayonnement de la flamme. On parle dans ce dernier cas de pertes par parois sèches.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

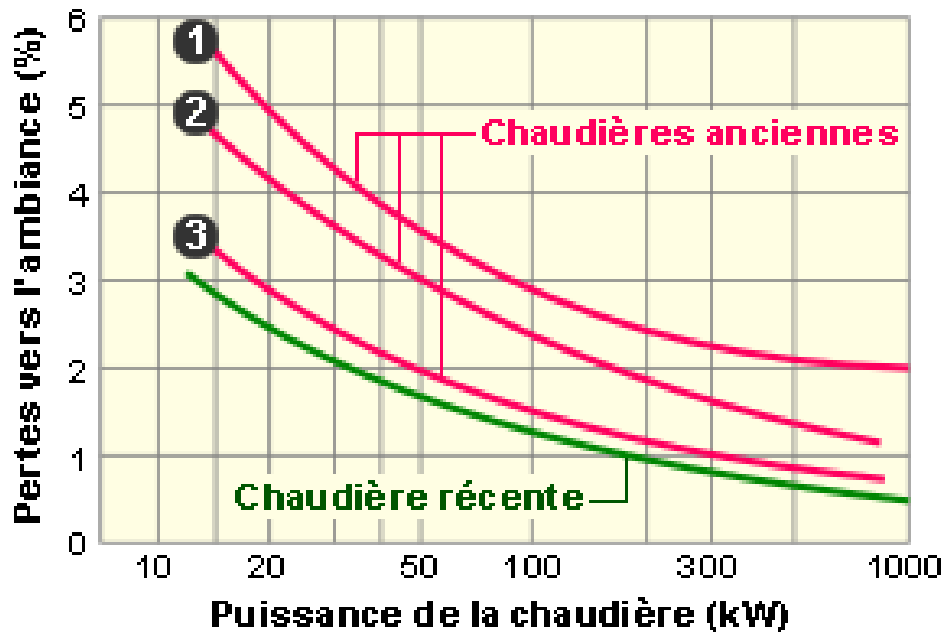
■ Pertes par l'ambiance

Les pertes par l'ambiance sont fonction notamment de la température moyenne de l'eau dans la chaudière, de la configuration de cette dernière et de son degré d'isolation (*attention aux surfaces non isolées telles que les portes ou le socle*). Elles sont donc en partie dépendantes de la vétusté de la chaudière et de sa régulation.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes par l'ambiance



- 1. Chaudières au charbon converties au fuel ;**
- 2. Chaudières au gaz atmosphérique;**
- 3. Chaudière au fuel ou gaz à brûleur pulsé.**

Pertes totales vers l'ambiance (pertes par parois sèches + pertes par parois irriguées) des anciennes chaudières lorsque le brûleur est en action, en pourcentage de la puissance de la chaudière.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Rendement saisonnier

■ Le **rendement saisonnier** η_{sais} est le rapport entre l'énergie totale transmise à l'eau de chauffage durant toute la saison de chauffe Q_u et l'énergie contenue dans le combustible consommé durant cette période Q_a :

$$\eta_{\text{sais}} = Q_u / Q_a$$

■ C'est ce rendement qui permet de chiffrer les performances globales de la chaudière. La consommation en combustible est directement liée à celui-ci.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt

La puissance des chaudières étant dimensionnée pour des températures extérieures extrêmes, celles-ci fonctionneront la plupart du temps à charge partielle. Dans ce cas, le brûleur, à l'exception des brûleurs modulants, alternera les périodes de fonctionnement et les périodes d'arrêt, de manière à obtenir la puissance moyenne nécessaire.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt

Le rendement nominal ne représentant que les performances de la chaudière durant le fonctionnement du brûleur, il importe d'introduire la notion de rendement saisonnier qui prendra également en compte les pertes de la chaudière durant les périodes d'arrêt de ce dernier.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt

Lorsque le brûleur est à l'arrêt, la chaudière conserve une certaine température. Dès lors, elle échangera de la chaleur :

□ Par rayonnement et convection, avec l'ambiance de la chaufferie (on peut la considérer comme un gros radiateur).

Remarquons que cette perte est inférieure aux pertes vers l'ambiance décrites ci-dessus. En effet lorsque le brûleur est en fonctionnement, certaines parties de la chaudière non en contact avec l'eau, s'échauffent par le rayonnement de la flamme (porte, le bas de la chaudière s'il n'est pas irrigué, ...), ce qui augmente les pertes totales vers l'ambiance..

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt

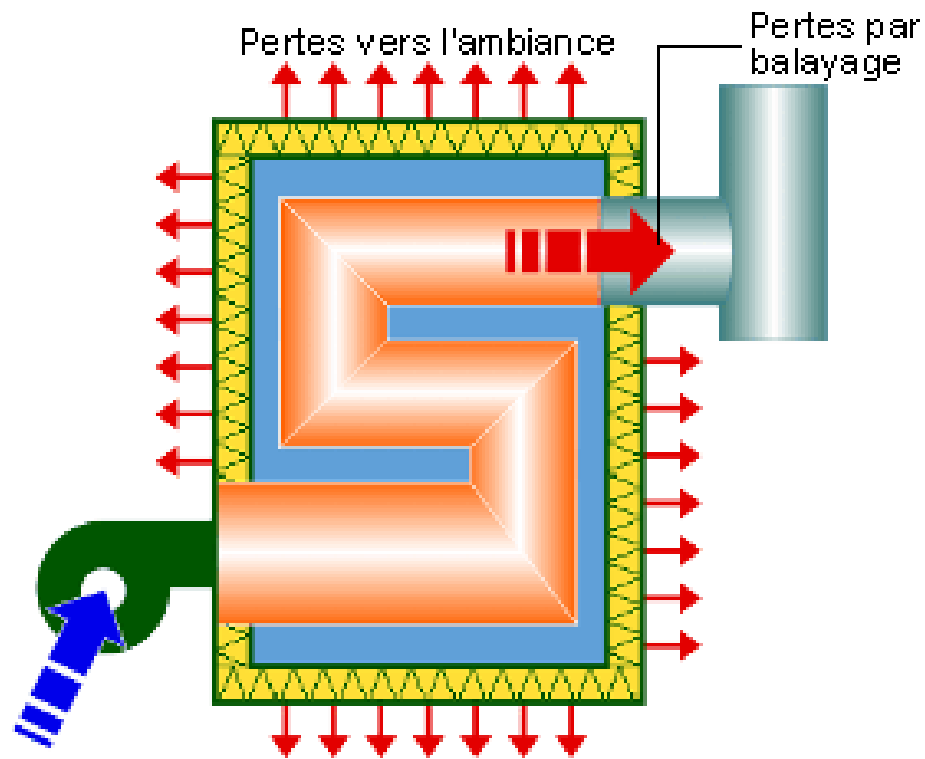
Lorsque le brûleur est à l'arrêt, la chaudière conserve une certaine température. Dès lors, elle échangera de la chaleur :

□ Par convection interne vers la cheminée. On parle de pertes par balayage. En effet, si l'amenée d'air du brûleur reste ouverte à l'arrêt (brûleur à air pulsé gaz ou fuel sans clapet d'air automatique ou brûleur gaz atmosphérique), l'intérieur chaud de la chaudière est en permanence parcouru par un courant d'air qui évacue sa chaleur vers la cheminée par tirage naturel.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt



Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt

Ces deux types de perte constituent les **pertes à l'arrêt ou d'entretien** de la chaudière. Les pertes d'entretien d'une chaudière s'expriment au travers d'un pourcentage de la puissance nominale de la chaudière :

le coefficient d'entretien ou de pertes à l'arrêt q_E :

$$\text{Pertes à l'arrêt [kW]} = q_E \times \text{Puissance nominale chaudière [kW]}$$

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes à l'arrêt

Le coefficient q_E d'une chaudière est repris dans sa documentation technique en fonction de sa température de fonctionnement.

q_E varie en fonction de cette température, approximativement, suivant la formule :

$$q_{E2} = q_{E1} \times \left(\frac{T_{\text{chau2}} - T_{\text{amb}}}{T_{\text{chau1}} - T_{\text{amb}}} \right)^{1,25}$$

Où:

q_{E2} , q_{E1} = les coefficients de perte à l'arrêt pour une température d'eau de chaudière respectivement de T_{chau2} et T_{chau1} et une température de chaufferie de T_{amb} .

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Expression du rendement saisonnier

On peut exprimer le rendement saisonnier d'une chaudière par la formule de Dittrich :

$$\eta_{\text{sais}} = \eta_{\text{utile}} / (1 + q_E \times (n_T/n_B - 1))$$

Où

- η_{utile} = rendement utile (quand le brûleur fonctionne);
- n_T = nombre total d'heures de la saison de chauffe [h];
- n_B = nombre d'heure de fonctionnement du brûleur durant l'année [h];
- n_B/n_T = temps de fonctionnement du brûleur / temps d'utilisation de la chaudière, est aussi appelé **facteur de charge** de la chaudière.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Facteurs d'influence du rendement saisonnier

Le rendement saisonnier augmente :

- ❑ quand le réglage de la combustion est optimal (augmentation du rendement de combustion);
 - ❑ quand la température de l'eau diminue (augmentation de l'échange entre les fumées et l'eau et diminution des pertes à l'arrêt);
 - ❑ quand la puissance du brûleur est la plus proche possible des besoins (augmentation du facteur de charge et diminution des temps d'arrêt de la chaudière), c'est-à-dire, en ne surdimensionnant pas le brûleur, en utilisant un brûleur 2 allures ou modulant).
-

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Facteurs d'influence du rendement saisonnier

Par exemple, un brûleur modulant (gaz ou fuel) qui pourrait faire varier sa puissance entre 0 et 100, fonctionnerait en permanence, supprimant ainsi les temps d'attente de la chaudière. Le facteur de charge de la chaudière serait égal à 1 et le rendement saisonnier serait égal au rendement utile, c'est-à-dire quasi égal au rendement de combustion (aux pertes vers l'ambiance près).

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes au démarrage et à l'arrêt du brûleur

La mesure du rendement de combustion ne prend en compte la qualité de combustion que lorsque le brûleur est en régime. Elle néglige les pertes qui apparaissent lors de l'allumage et de l'arrêt du brûleur.

Dans la pratique et, même avec un brûleur le plus finement réglé, il est impossible d'éviter, à certains moments, la formation de CO, d'imbrûlés et d'émissions polluantes comme les NOx. Ces derniers sont évidemment toxiques et leur formation diminue légèrement le rendement de combustion moyen et accélère l'encrassement de la chaudière.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes au démarrage et à l'arrêt du brûleur

Ils apparaissent inévitablement au démarrage et à l'arrêt du brûleur.

Au démarrage, par exemple, on injecte du combustible qui doit s'enflammer. Les premières gouttes ne pourront le faire correctement car elles ne se trouveront pas dans les conditions idéales de mélange et de température. Un phénomène semblable se déroule à l'arrêt pour les dernières gouttes injectées.

Centrales thermiques

Rendement d'une chaudière

■ Pertes au démarrage et à l'arrêt du brûleur

Il est difficile de chiffrer les pertes et les émissions polluantes complémentaires que cela engendre. Il faut cependant avoir en tête que celles-ci seront d'autant plus importantes que le nombre de cycles de marche/arrêt des brûleurs est élevé.

Centrales thermiques

Récapitulatif

- Rendement théorique maximal d'une turbine à vapeur: $\eta = 1 - T_2/T_1$

- Rendement nominal ou rendement utile d'une chaudière:

$$\eta_{\text{utile}} = P_u / P_a$$

$$\eta_{\text{utile}} = (P_a - \text{Pertes fumées} - \text{Pertes ambiance}) / P_a$$

$$\eta_{\text{utile}} = \eta_{\text{comb}} - \%q_r$$

- Rendement de combustion:

$$\eta_{\text{comb}} = (P_a - \text{Pertes fumées}) / P_a$$

$$\eta_{\text{comb}} = 100 - f \times (T_{\text{fumées}} - T_{\text{amb}}) / \%CO_2$$

- Rendement saisonnier:

$$\eta_{\text{sais}} = Q_u / Q_a$$

$$\eta_{\text{sais}} = \eta_{\text{utile}} / (1 + q_E \times (n_T/n_B - 1))$$