

"Analyse énergétique des bâtiments" Notes de Cours
Préparé par D. Mather

EA1 - FONDEMENTS DE L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

<u>Sujet</u>	<u>Page</u>
1. Transferts d'énergie	3
2. Facteurs d'émissions de GES	11
3. Surfaces simples transmettant la chaleur	13
4. Analyse du volume de contrôle	14
5. Chauffage ou refroidissement sensible d'un fluide	16
6. Dispositifs de conversion de l'énergie et "efficacité énergétique"	18
7. Conduits de transport d'énergie	23
8. Échangeurs de chaleur	24
9. Pompes à chaleur	25
10. Capacité de l'équipement	27
11. Pompes et ventilateurs	28
12. Composants connectés en série	29
13. Rendement en régime permanent du four ou de la chaudière à combustion	33
14. Conversion du travail en chaleur	38

Aperçu du module

Ce module fournit un résumé concis de certains concepts fondamentaux de l'analyse énergétique qui seront utilisés tout au long du cours. Pour de nombreux étudiants, une partie du matériel sera une révision des concepts couverts précédemment dans les cours de thermodynamique.

Résultats d'apprentissage visés par le cours :

- Appliquer les calculs énergétiques de base à une variété de composants et de systèmes ayant un impact sur l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.

1. Transferts d'énergie

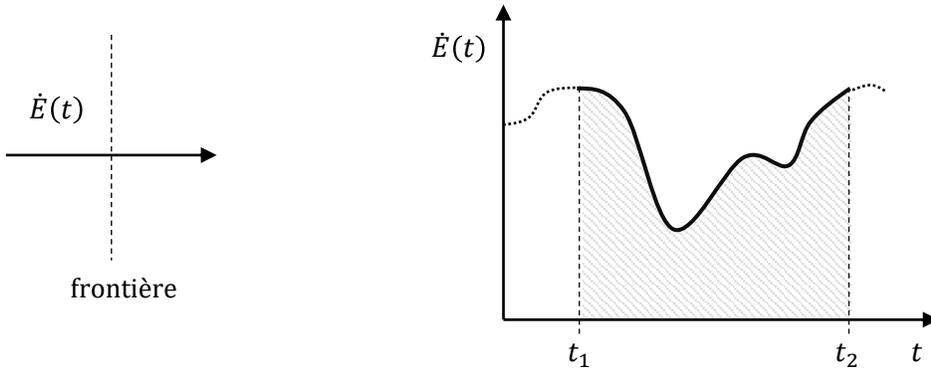
1.1 Transferts généraux d'énergie

Dans le cadre d'une analyse énergétique, on s'intéresse parfois à la quantité totale d'"énergie utilisée" sur une période déterminée (par ex., heure, semaine, année, etc.) et parfois aux flux d'énergie "instantanés".

L'énergie totale transférée au cours d'une période donnée est constituée de tous les "petits bouts" d'énergie transférés au cours des nombreux et brefs instants qui composent cette période.

Considérons un flux d'énergie traversant une frontière à un taux variable $\dot{E}(t)$ (pour l'instant, nous pouvons imaginer que l'énergie est transférée sous forme de chaleur ou de travail).

Unités : Pour l'instant, disons que est $\dot{E}(t)$ évalué comme $kJ/s = kW$.



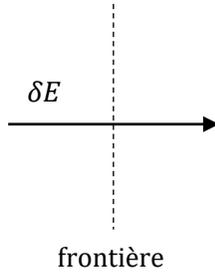
L'énergie totale transférée (kJ) pendant une période finie $\Delta t_{1 \rightarrow 2} = t_2 - t_1$:

$$E_{1 \rightarrow 2} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}(t) \cdot dt$$

Le taux moyen de transfert (kW) au cours de la période d'évaluation :

$$\bar{\dot{E}}_{1 \rightarrow 2} = \frac{E_{1 \rightarrow 2}}{\Delta t_{1 \rightarrow 2}}$$

Considérons un "bref instant" (durée = dt) au cours de la période qui nous intéresse :



δE = infime quantité d'énergie transférée

dt = le minuscule laps de temps pendant lequel franchit la frontière

Taux moyen de transfert d'énergie à tout moment de la période :

$$\frac{\delta E}{dt} = \dot{E}(t) \quad \rightarrow \quad \delta E = \dot{E}(t) \cdot dt$$

Pour l'ensemble de la période concernée :

$$E_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \delta E = \int_1^2 \dot{E}(t) \cdot dt$$

Nous pouvons réviser notre notation en fonction de la forme du transfert d'énergie. Par exemple, le taux de transfert d'énergie sous forme de chaleur est généralement désigné par $\dot{Q}(t)$ et le travail par $\dot{W}(t)$:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \delta Q = \int_1^2 \dot{Q}(t) \cdot dt$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 \dot{W}(t) \cdot dt$$

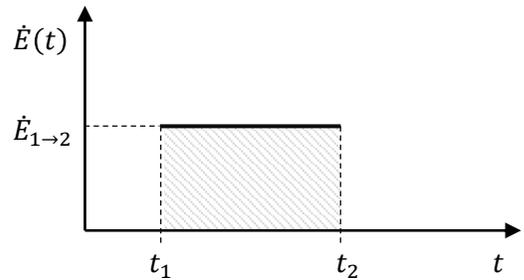
Cas particuliers :

1. Taux de transfert d'énergie constant (c'est-à-dire pendant $\Delta t_{1 \rightarrow 2}$)

$$\dot{E}(t) = \dot{E}_{1 \rightarrow 2}$$

$$\begin{aligned} E_{1 \rightarrow 2} &= \int_1^2 \dot{E}_{1 \rightarrow 2} \cdot dt = \dot{E}_{1 \rightarrow 2} \int_1^2 dt \\ &= \dot{E}_{1 \rightarrow 2} \cdot \Delta t_{1 \rightarrow 2} \end{aligned}$$

$$\bar{\dot{E}}_{1 \rightarrow 2} = \dot{E}_{1 \rightarrow 2}$$



2. Le taux de transfert varie entre deux valeurs (\dot{E}_A et \dot{E}_B)

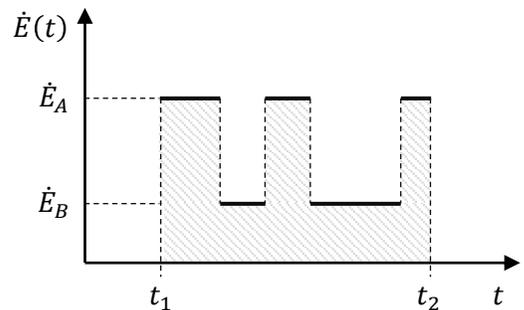
Δt_A = temps total au taux A

Δt_B = temps total à la vitesse B

$$\Delta t_{1 \rightarrow 2} = \Delta t_A + \Delta t_B$$

$$f_A = \frac{\Delta t_A}{\Delta t_A + \Delta t_B} = \frac{\Delta t_A}{\Delta t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$f_B = \frac{\Delta t_B}{\Delta t_A + \Delta t_B} = \frac{\Delta t_B}{\Delta t_{1 \rightarrow 2}}$$



f_A = fraction de temps dans l'état A, f_B = fraction de temps dans l'état B

$$f_A + f_B = 1$$

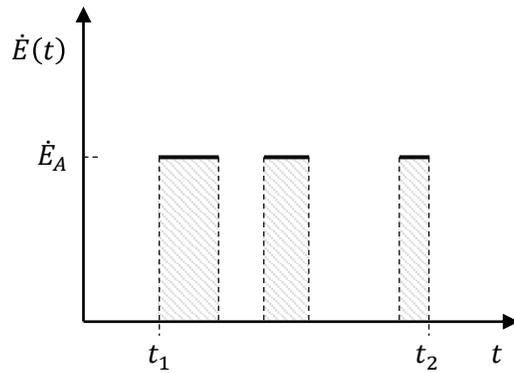
$$E_{1 \rightarrow 2} = \dot{E}_A \cdot \Delta t_A + \dot{E}_B \cdot \Delta t_B$$

$$\bar{\dot{E}}_{1 \rightarrow 2} = \frac{E_{1 \rightarrow 2}}{\Delta t_{1 \rightarrow 2}} = \dot{E}_A \cdot f_A + \dot{E}_B \cdot f_B = \dot{E}_A \cdot f_A + \dot{E}_B \cdot (1 - f_A)$$

Si $\dot{E}_B = 0$:

$$E_{1 \rightarrow 2} = \dot{E}_A \cdot \Delta t_A$$

$$\bar{E}_{1 \rightarrow 2} = \dot{E}_A \cdot f_A$$



Remarque : nous pourrions qualifier ce dernier cas de simple dispositif "marche-arrêt". Il consomme de l'énergie à un taux à peu près constant lorsqu'il est allumé, et consomme zéro énergie (ou une énergie négligeable) lorsqu'il est éteint.

1.2 Transfert d'énergie par combustible de combustion

Nous utiliserons généralement une approche simple pour évaluer le transfert d'énergie avec un combustible (par exemple, le gaz naturel, le mazout) : le concept de "pouvoir calorifique" du combustible.

Le pouvoir calorifique (PC) désigne généralement la quantité d'énergie thermique (chaleur) qui résulterait de la combustion complète d'une quantité donnée de combustible.

Remarque : sauf indication contraire, nous utiliserons le "pouvoir calorifique supérieur" (PCS) d'un combustible. (Nous n'utiliserons pas le pouvoir calorifique inférieur, PCI).

Par exemple Gaz naturel : $PCS \approx 38 \text{ MJ}/\text{m}^3$ (m standard³ à 15°C, 101.325 kPa)

Pour une mesure de carburant en volume (V) :

$$E = HV_v \cdot V \quad \text{p. ex.} \quad (\text{MJ}/\text{m}^3) \cdot (\text{m}^3) = \text{MJ}$$

$$\dot{E} = HV_v \cdot \dot{V} \quad \text{p. ex.} \quad (\text{MJ}/\text{m}^3) \cdot (\text{m}^3/\text{s}) = \text{MW}$$

Pour une mesure de la masse du carburant (m) :

$$E = HV_m \cdot m \quad \text{p. ex.} \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \cdot (\text{kg}) = \text{kJ}$$

$$\dot{E} = HV_m \cdot \dot{m} \quad \text{p. ex.} \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \cdot (\text{kg}/\text{s}) = \text{kW}$$

Note : Les taux indiqués ci-dessus peuvent être variables dans le temps, mais le (t) a été supprimé de la notation, par exemple $\dot{V} = \dot{V}(t)$.

Valeurs calorifiques approximatives pour certains combustibles :

Gaz naturel 38 MJ / m³

Propane 25 MJ / L

Mazout léger 38 MJ / L

1.3 Transfert d'énergie sous forme de puissance mécanique et électrique

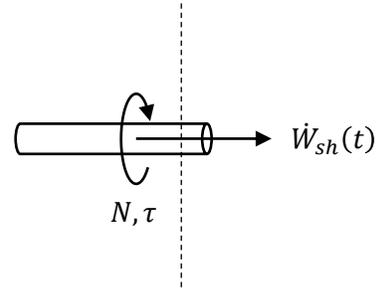
Puissance mécanique (arbre rotatif) :

$$\dot{W}_{sh} = N \cdot \tau$$

N = vitesse de rotation (rad/s)

τ = couple ($N \cdot m$)

\dot{W}_{sh} = puissance de l'arbre (W)



Puissance électrique (CA, monophasé) :

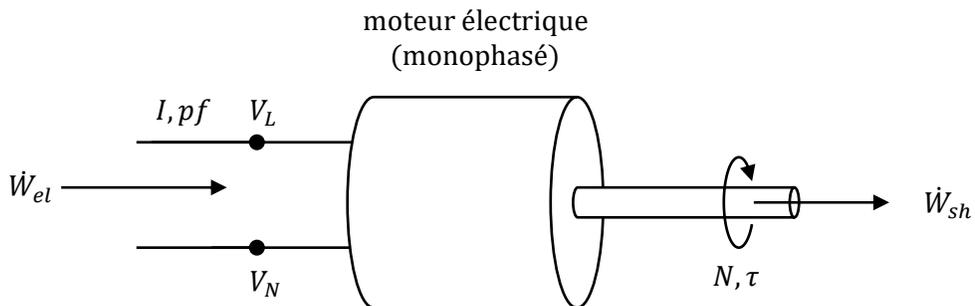
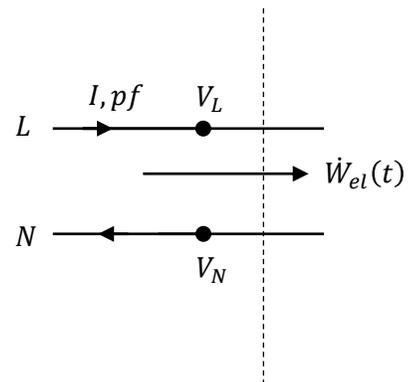
$$\dot{W}_{el} = V \cdot I \cdot pf$$

V = Différence de tension (entre la ligne et le neutre), en volts efficaces

I = courant de ligne, ampères efficaces

pf = facteur de puissance, (sans dimension)

\dot{W}_{el} = puissance réelle, en watts



Puissance électrique (CA, triphasé, équilibré V, I, pf) :

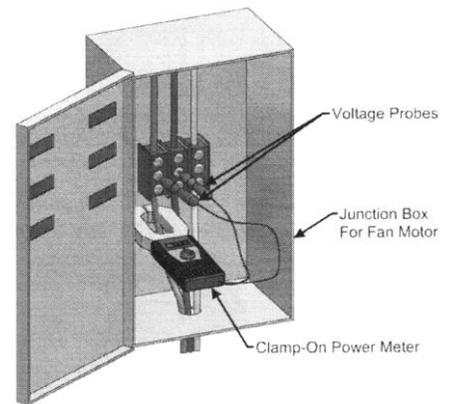
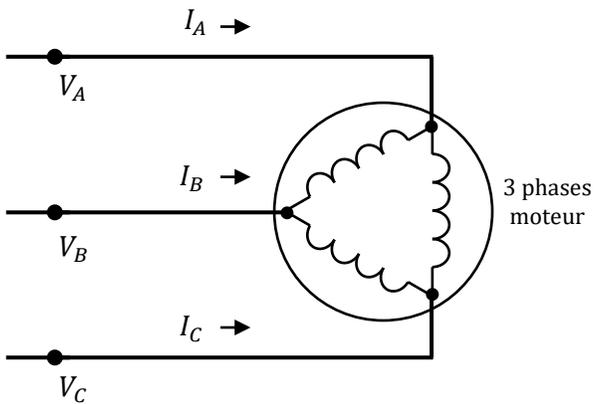
$$\dot{W}_{el} = \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{L-L} \cdot \bar{I} \cdot \overline{pf}$$

\bar{V}_{L-L} = différence de tension moyenne (de ligne à ligne), en volts eff.

\bar{I} = moyenne des courants de ligne, en ampères efficaces

\overline{pf} = moyenne des facteurs de puissance des lignes

par exemple, moteur triphasé (schéma de câblage)



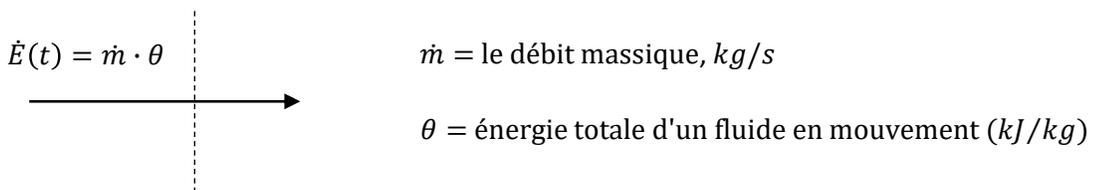
Tensions ligne à ligne : A-B, A-C, B-C

1.4 Transfert d'énergie par écoulement des fluides

Cette section traite du transfert d'énergie avec un fluide traversant une frontière. Les fluides qui peuvent être analysés à l'aide de ces méthodes sont l'air, l'eau et les réfrigérants (c'est-à-dire les fluides répondant à la définition thermodynamique de "substance compressible simple").

L'énergie est transférée lorsqu'un fluide se déplace à travers cette limite. Ce transfert comprend l'énergie transportée par la masse qui s'écoule et le "travail d'écoulement" (travail PdV) associé à la force de poussée qui fait que la masse se déplace à travers la frontière.

En thermodynamique, le transfert d'énergie totale avec le transfert de masse :


$$\dot{E}(t) = \dot{m} \cdot \theta$$

\dot{m} = le débit massique, kg/s

θ = énergie totale d'un fluide en mouvement (kJ/kg)

Définition typique de θ :

$$\theta = h + ke + pe$$

h = enthalpie (kJ/kg) ← dépend de l'état du fluide (par exemple T, P, phase)

ke = énergie cinétique spécifique (kJ/kg)

pe = énergie potentielle spécifique (kJ/kg)

Dans ce cours, nous travaillerons principalement sur des applications où les considérations ke et pe sont négligeables. Nous écrirons donc généralement :

$$\dot{E}(t) = \dot{m} \cdot h$$

Il est parfois plus pratique de travailler avec un débit volumétrique ($\dot{V}, m^3/s$) qu'avec un débit massique ($\dot{m}, kg/s$). La densité du fluide ($\rho, kg/m^3$) ou le volume spécifique ($v, m^3/kg$) peuvent être utilisés pour passer d'une méthode à l'autre :

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}$$

2. Facteurs d'émissions de GES

Pour la combustion sur site

Les "facteurs d'émission" pour les processus de combustion typiques peuvent être utilisés pour fournir des estimations simples des émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de l'utilisation de combustibles sur le site.

Par exemple, les émissions estimées provenant de la combustion d'un mètre cube standard (1 m³) de gaz naturel en Ontario :

$$\approx 1900 \text{ g CO}_2\text{e/m}^3 = 1.9 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \quad (\text{CO}_2\text{e} = \text{équivalent CO}_2)$$

Basé sur : [Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada, partie 2, annexe 6 \(2020\)](#) (voir détails page suivante)

Les facteurs d'émission sont appliqués de la même manière que les facteurs de coût. Prenons l'exemple d'une maison qui consomme 5,000 m³ de gaz naturel par an et dont le coût du combustible est de 0,25 \$/m³ :

consommation annuelle de carburant	= 5000 m ³
coût annuel du carburant	= 1250 \$ (0,25 \$/m ³)
annuel CO ₂	= 9500 kg CO ₂ e (1,9 kg CO ₂ e/m ³)

Pour l'électricité

L'impact des émissions de gaz à effet de serre dues à la consommation d'électricité sur le site dépend fortement de la composition du réseau électrique régional. Par exemple, le tableau ci-dessous montre une très large gamme de facteurs d'émissions pour plusieurs juridictions au Canada.

Intensité moyenne en GES de la consommation d'électricité (g eCO₂/kWh)

Province	1990	2000	2005	2015	2016	2017
Nouvelle-Écosse	770	920	950	740	720	730
Québec	14	4.1	4.3	1.6	1.8	1.4
Ontario	220	320	250	40	40	20
Manitoba	29	38	10.3	3.9	2.1	1.9
Saskatchewan	890	940	840	740	690	720
Alberta	1000	1000	990	890	830	790
Colombie-Britannique	19	38	27	9.9	13	10.2

Extrait du [Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada, partie 3, annexe 13 \(2020\)](#).

A part :

Évaluation du facteur d'émission moyen pour la combustion

Extrait du [Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada, partie 2, annexe 6 \(2020\)](#) :

Émissions provenant de la combustion du gaz naturel (Ontario) :

$\text{CO}_2 = 1888 \text{ g/m}^3$ (tableau A6.1-1)

$\text{CH}_4 = 0,037 \text{ g/m}^3$ (tableau A6.1-2)

$\text{N}_2\text{O} = 0,035 \text{ g/m}^3$ (tableau A6.1-2)

Tiré du [Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada, partie 1, tableau 1-1](#) :

Potentiel de réchauffement planétaire (PRP) : (masse équivalente de CO_2)

$\text{CO}_2 = 1$

$\text{CH}_4 = 25$

$\text{N}_2\text{O} = 298$

Sur la base des informations ci-dessus, nous pouvons estimer les émissions d'équivalent CO_2 résultant de la combustion de 1 m^3 de gaz naturel en Ontario :

Espèces	Émissions (g/m^3)	PRP ($\text{g eCO}_2/\text{g}$)	eCO_2 (g/m^3)
CO_2	1888	1	1888
CH_4	0.037	25	0.925
N_2O	0.035	298	10.43
Total	-	-	1899.355

(Fin de l'aparté)

3. Surfaces simples transmettant la chaleur

Il arrive fréquemment que l'on s'intéresse à la transmission de la chaleur à travers une surface séparant un environnement plus chaud d'un environnement plus froid. Dans de nombreuses conditions, nous pouvons utiliser une simple équation pour décrire les facteurs clés ayant un impact sur le débit de chaleur constant :

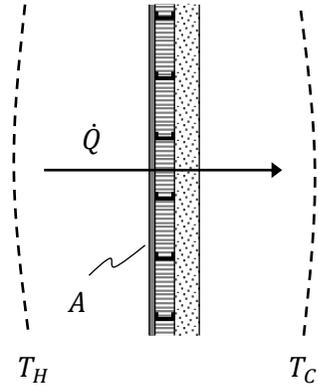
$$\dot{Q} = UA(T_H - T_C)$$

\dot{Q} = le taux de transfert thermique total (W) entre les deux environnements (T_H et T_C), à travers la surface A

A = surface (m^2), perpendiculaire à la direction de transfert de chaleur

T_H, T_C = températures ($^{\circ}C$) des environnements

U = "coefficient de transmission thermique effectif" ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$) de la surface séparant les deux environnements



La transmission thermique effective U indique la facilité avec laquelle une surface permet à la chaleur de se déplacer à travers elle. Il s'agit de l'inverse du concept de résistance thermique (R), qui décrit la capacité à résister au flux de chaleur.

$$\dot{Q} = UA(T_H - T_C) = \frac{A}{R}(T_H - T_C)$$

Dans l'exemple ci-dessus, les unités de R sont l'inverse de celles de U , donc $m^2 \cdot ^{\circ}C/W$.

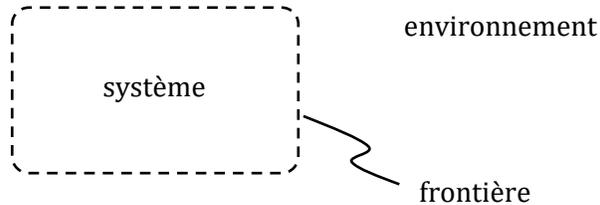
Dans les enveloppes de bâtiment, les valeurs U peuvent varier d'environ $6 W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ (par exemple, une simple vitre) à $0,2 W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ou moins (pour les assemblages "super-isolés").

Nous reviendrons plus tard sur ce sujet avec beaucoup plus de détails.

4. Analyse du volume de contrôle

Nous effectuerons souvent des analyses énergétiques en utilisant le concept de volume de contrôle (CV) :

- CV = une région de l'espace que nous définissons pour l'analyse. Nous choisissons une frontière qui sépare le CV de son environnement. L'"intérieur" du CV peut être appelé le "système" et tout le reste est l'"environnement".

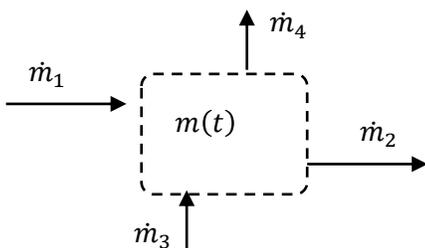


- Notre analyse consistera généralement à effectuer un bilan sur le CV (par exemple, un bilan énergétique, un bilan de masse). Forme générale du bilan :

$$\text{Taux net d'accumulation} = \text{Taux net d'ajout} - \text{Taux net de retrait}$$

Solde général m

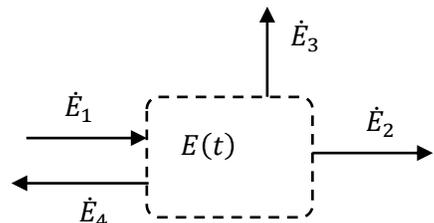
$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out}$$



$m(t)$ = masse stockée dans le CV

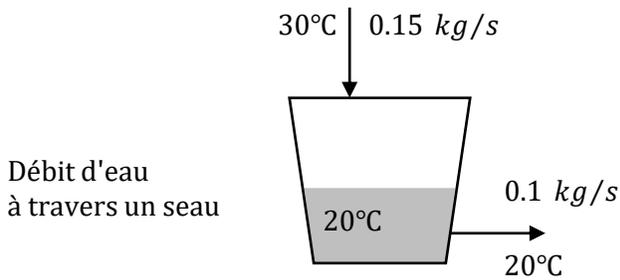
Solde général E

$$\frac{dE(t)}{dt} = \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out}$$



$E(t)$ = l'énergie stockée dans le CV

Exemple :



$$\frac{dm(t)}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

$$= 0.15 \text{ kg/s} - 0.1 \text{ kg/s}$$

$$= 0.05 \text{ kg/s}$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out}$$

$$= ?$$



Besoin d'une méthode pour évaluer h afin de calculer le résultat. (Mais il devrait être évident que $dE(t)/dt > 0$, c'est-à-dire l'énergie stockée dans le seau, augmente).

Cas particulier

"État stable, flux constant" (SS-SF) ...ou simplement "constant"

Taux net d'accumulation = 0

$$\cancel{\frac{dm(t)}{dt}} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out}$$

$$\cancel{\frac{dE(t)}{dt}} = \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out}$$

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

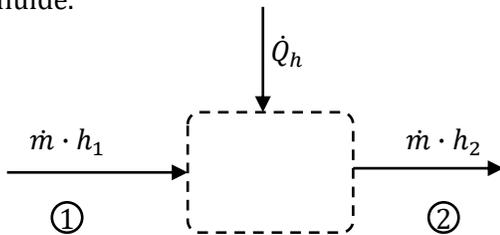
$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out}$$

Plus tard : Discutez d'un système "quasi stable".

5. Chauffage ou refroidissement sensible d'un fluide

Il arrive fréquemment qu'un fluide soit chauffé ou refroidi de telle sorte que la seule modification importante de son état soit un changement de température. (Cela peut être comparé à d'autres changements possibles, tels qu'un changement de phase, par exemple ébullition/condensation, ou humidification/déshumidification d'un flux d'air). Lorsque le processus de chauffage/refroidissement se produit de telle sorte que le seul impact important sur l'état du fluide est son changement de température, on parle de "chauffage sensible" ou de "refroidissement sensible".

Considérons un flux de fluide passant régulièrement à travers un "réchauffeur de fluide". S'il s'agit d'un processus de chauffage sensible, le changement d'enthalpie du fluide peut être estimé en utilisant le changement de température et la "chaleur spécifique" du fluide.



$$\dot{m} \cdot h_1 + \dot{Q}_h = \dot{m} \cdot h_2$$

$$\rightarrow \dot{Q}_h = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

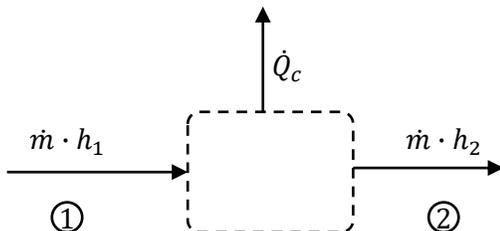
$$c_p(T) = \frac{dh(T)}{dT} = \text{chaleur spécifique du fluide, kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Pour un processus où $c_p \approx$ constante pour les températures de fluide rencontrées :

$$c_p \approx \frac{\Delta h}{\Delta T} \rightarrow \Delta h \approx c_p \Delta T \rightarrow h_2 - h_1 \approx c_p(T_2 - T_1)$$

$$\therefore \dot{Q}_h \approx \dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

De même, pour un processus de refroidissement sensible :



$$\dot{m} \cdot h_1 = \dot{m} \cdot h_2 + \dot{Q}_c$$

$$\rightarrow \dot{Q}_c = \dot{m}(h_1 - h_2) \approx \dot{m} c_p (T_1 - T_2)$$

Propriétés approximatives des fluides à la température ambiante et à 1 atm :

Air : $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$\rho c_p \approx 1.23 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} = 1.23 \frac{\text{J}}{\text{L} \cdot ^\circ\text{C}} = 1.23 \frac{\text{W}}{\text{L/s} \cdot ^\circ\text{C}}$$
$$\approx 1.08 \frac{\text{btu/hr}}{\text{cfm} \cdot ^\circ\text{F}}$$

L'eau : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/L}$
 $c_p = 4.2 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$\rho c_p \approx 4200 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} = 4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{L} \cdot ^\circ\text{C}} = 4.2 \frac{\text{kW}}{\text{L/s} \cdot ^\circ\text{C}}$$
$$\approx 500 \frac{\text{btu/hr}}{\text{gpm} \cdot ^\circ\text{F}}$$

Remarque : nous travaillerons plus tard sur l'analyse psychrométrique. Mais les valeurs fournies ci-dessus pour l'air permettront d'effectuer des calculs "à l'arrière de l'enveloppe" (pour le chauffage/refroidissement sensible de l'air).

6. Dispositifs de conversion de l'énergie et efficacité énergétique

6.1 Dispositifs de conversion de l'énergie

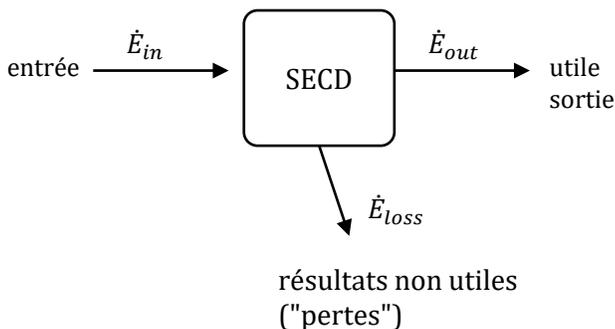
Nous utiliserons le terme "dispositif de conversion d'énergie" (DCE) comme terme générique pour un dispositif qui reçoit de l'énergie d'entrée sous une forme et fournit de l'énergie de sortie utile sous une autre forme.

Exemples :

- Moteur électrique : électricité → puissance mécanique (puissance de l'arbre)
- Lampe électrique : électricité → lumière visible ("lumens")
- Chauffe-eau au gaz naturel : énergie chimique (gaz naturel) → énergie thermique (chaleur)
- Pompe centrifuge : puissance mécanique (puissance de l'arbre) → puissance du fluide (débit et pression)
- Chauffage électrique à résistance : électricité → énergie thermique (chaleur)

En général, l'énergie utile produite par un DEC est inférieure à l'énergie introduite en raison d'inefficacités (c'est-à-dire d'"irréversibilités" thermodynamiques) dans la conversion. Cette différence est parfois appelée "pertes" de conversion énergétique. Les pertes n'indiquent pas que l'énergie a disparu, mais plutôt qu'une partie de l'entrée est devenue une forme d'énergie qui n'est pas considérée comme faisant partie de la sortie utile de l'appareil - souvent cette autre forme est la chaleur.

Considérons l'analyse d'un DCE traité comme un CV fonctionnant en SS-SF. Pour l'instant, nous supposons que le dispositif reçoit une forme d'énergie d'entrée et fournit une forme d'énergie de sortie utile. Appelons ce type de dispositif un dispositif de conversion d'énergie simple (SECD).

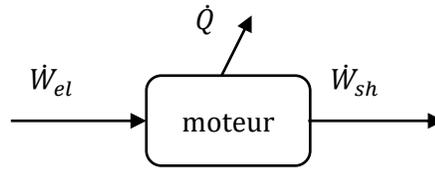


$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} + \dot{E}_{loss}$$

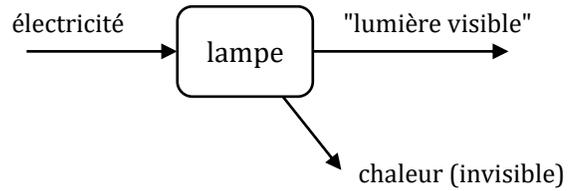
$$\rightarrow \dot{E}_{loss} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$$

Exemples :

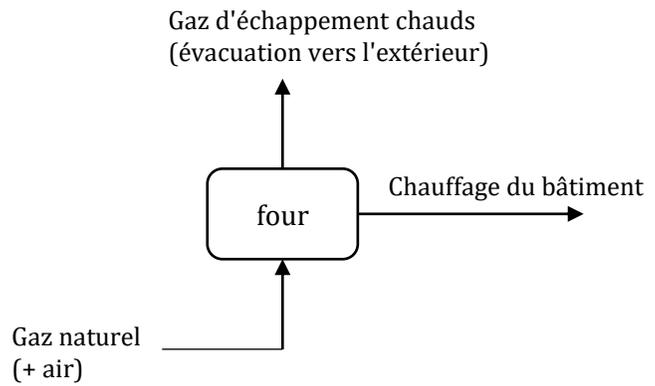
Moteur électrique



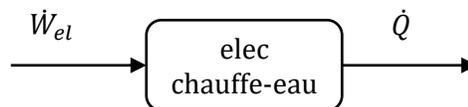
Lampe électrique



Fourneau à gaz naturel



Résistance électrique

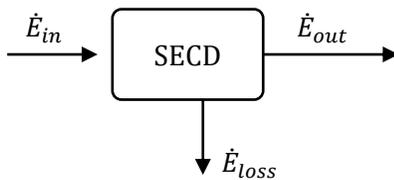


6.2 Efficacité énergétique

Pour un DPE, la définition typique de l'efficacité énergétique :

$$\text{l'efficacité} = \eta = \frac{\text{benefit}}{\text{cost}} = \frac{\text{useful output}}{\text{input}}$$

Pour un SECD dans des conditions de fonctionnement stables :



$$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{loss}$$

$$\eta = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}}$$

$$= \frac{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{loss}}{\dot{E}_{in}} = 1 - \frac{\dot{E}_{loss}}{\dot{E}_{in}}$$

Souvent, notre intérêt sera de déterminer l'énergie d'entrée nécessaire (et notre objectif est de réduire cette énergie d'entrée). La forme suivante de l'équation d'efficacité sera donc utile :

$$\dot{E}_{in} = \frac{\dot{E}_{out}}{\eta} \quad \rightarrow \quad \text{input} = \frac{\text{output}}{\text{efficiency}}$$

Cela nous donne l'occasion d'examiner les options de base pour réduire l'énergie d'entrée. L'équation ci-dessus indique qu'il faut essayer de réduire la puissance requise (\dot{E}_{out}) ou d'augmenter l'efficacité de l'appareil (η), ou les deux.

Si nous considérons \dot{E}_{out} comme la raison pour laquelle l'appareil fonctionne, nous pourrions nous référer à \dot{E}_{out} comme indiquant la "charge" de l'appareil. La réduction de la charge contribuera probablement à réduire l'énergie d'entrée requise.

Types d'efficacité

L'efficacité d'un dispositif n'est pas nécessairement constante dans le temps. Certains dispositifs peuvent avoir des rendements qui varient considérablement dans les différentes conditions de fonctionnement rencontrées. La définition et le calcul de l'efficacité peuvent varier en fonction de la situation considérée.

"Efficacité instantanée"

Si nous déterminons les taux d'entrée et de sortie d'un appareil à un moment donné, nous pouvons déterminer l'efficacité instantanée :

$$\eta(t) = \frac{\dot{E}_{out}(t)}{\dot{E}_{in}(t)}$$

Si cette évaluation est faite alors que l'appareil fonctionne de manière stable, on parle de rendement en régime permanent. (On parle parfois de "rendement nominal").

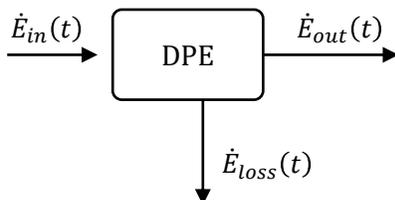
$$\eta = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}}$$

"Efficacité moyenne dans le temps"

Si nous nous intéressons à un dispositif qui fonctionne sur une longue période et dans un large éventail de conditions (p. ex., l'équipement de chauffage/refroidissement d'un bâtiment), nous pouvons nous intéresser à l'efficacité moyenne sur la période en question.

Par exemple, pour une chaudière de chauffage, on peut s'intéresser au rendement moyen sur une année entière ("rendement annuel") ou pendant la saison de chauffage ("rendement saisonnier"), bien qu'en pratique il ne s'agisse que de termes différents pour désigner la même chose.

Disons que le diagramme ci-dessous représente une chaudière dont nous pouvons suivre les taux d'entrée et de sortie à chaque instant. Les équations de droite fournissent l'énergie totale en entrée et l'énergie utile en sortie sur une année (c'est-à-dire l'intégration sur l'année).



$$E_{out} = \int \dot{E}_{out}(t) \cdot dt$$

$$E_{in} = \int \dot{E}_{in}(t) \cdot dt$$

Avec la production annuelle = E_{out} et l'apport annuel = E_{in} , l'efficacité annuelle moyenne est la suivante :

$$\eta_{annual} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{\int \dot{E}_{out}(t) \cdot dt}{\int \dot{E}_{in}(t) \cdot dt}$$

Ou si nous disposons d'une estimation de la charge annuelle de l'équipement et d'une estimation de son efficacité annuelle, nous pouvons estimer son énergie d'entrée annuelle (par exemple, la consommation de carburant) :

$$E_{in} = \frac{E_{out}}{\eta_{annual}} \quad \rightarrow \quad input = \frac{output}{efficiency}$$

D'autres types d'efficacité seront examinés ultérieurement.

7. Conduits de transport d'énergie

La plupart des systèmes énergétiques comprennent des composants qui permettent le transport de l'énergie d'un endroit à un autre, par exemple :

- L'électricité est transportée par des fils/conducteurs
- Air véhiculé dans les conduits
- Eau chaude (ou autres fluides, y compris le gaz naturel) transportée dans des tuyaux

Nous pourrions utiliser le terme "conduit de transport d'énergie" comme terme général pour décrire les composants ayant cette fonction de transport.

D'autres composants ou systèmes peuvent également correspondre à cette description. Par exemple, la lumière du soleil passant par une fenêtre ou un puits de lumière peut être intentionnellement dirigée vers un endroit précis grâce à une disposition adéquate des surfaces émettrices et réfléchissantes. (Nous pourrions qualifier la disposition qui permet cela de "conduit de lumière").

Quelques considérations sur les conduits :

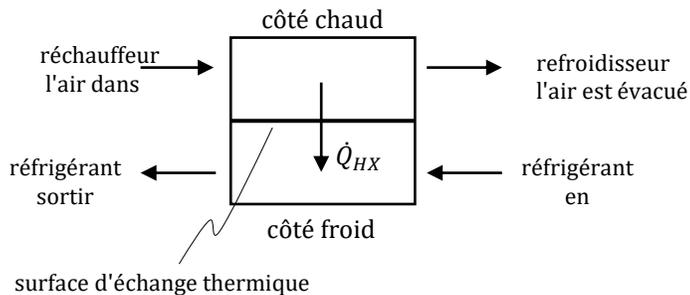
- Lorsque l'énergie circule dans un conduit, il est fréquent que des "pertes" se produisent, telles que les pertes de résistivité électrique dans le câblage ou le frottement des fluides dans les conduits de fluides. Ces pertes influencent la consommation d'énergie du système.
- La capacité d'un conduit à transporter de l'énergie a généralement une limite physique basée sur sa taille. Par exemple, il existe une limite au nombre d'ampères qu'un fil d'un certain diamètre (calibre) peut tolérer en toute sécurité (c'est ce que l'on appelle l'"ampacité" du fil). L'eau qui s'écoule à grande vitesse dans un tuyau risque d'endommager le matériau de ce dernier par érosion ; il existe donc une limite supérieure au débit (par exemple, L/min) dans un tuyau d'un diamètre donné.
- Le coût d'un conduit dépend fortement de sa taille physique. Les dimensions plus importantes nécessitent davantage de matériaux (par exemple, du cuivre pour le câblage, de l'acier pour la tuyauterie). L'augmentation de la taille peut accroître la capacité d'écoulement et réduire les pertes d'énergie dues au transport, mais elle augmente souvent le coût du système.

Les conduits seront abordés plus en détail ultérieurement.

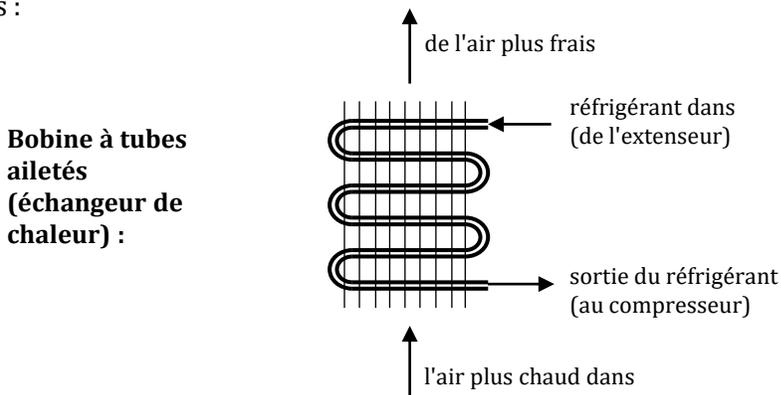
8. Échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont utilisés lorsque l'on souhaite transférer de la chaleur entre des fluides (sans les mélanger). À travers une surface d'échange, la chaleur circule d'une température plus élevée à une température plus basse. Pour ce cours, il suffira d'avoir une idée de base de ce qu'est un échangeur de chaleur - nous n'avons pas besoin de savoir comment les analyser.

Les schémas utilisent souvent une représentation simplifiée d'un échangeur de chaleur avec une surface d'échange séparant les deux fluides (c'est-à-dire le fluide chaud et le fluide froid). L'exemple ci-dessous illustre un "évaporateur" dans un système de climatisation :



La géométrie des échangeurs de chaleur peut être très complexe. L'aspect réel d'un échangeur de chaleur est généralement très différent de la représentation schématique. Le serpentin d'évaporation d'un système de climatisation peut ressembler au schéma ci-dessous :



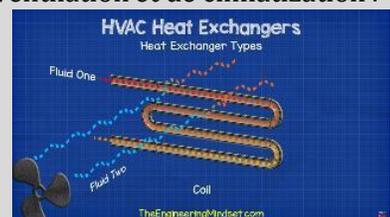
La vidéo suivante décrit les différents types d'échangeurs de chaleur et la manière dont ils sont souvent utilisés dans les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation :

"Explication des échangeurs de chaleur HVAC".

par TheEngineeringMindset.com

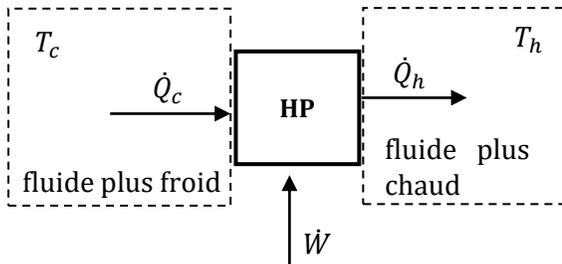
<https://youtu.be/NCvYPclQNWM>

(environ 19 minutes)



9. Pompes à chaleur

La "pompe à chaleur" (PAC) est un terme général que nous utiliserons pour décrire une machine ou un système qui absorbe la chaleur d'un fluide (ou d'un endroit) plus froid et la restitue à un fluide (ou un endroit) plus chaud, avec un apport d'énergie sous forme de travail (généralement de l'électricité) nécessaire pour faire fonctionner la pompe à chaleur.



Exemples :

- Réfrigérateur ménager
- Climatiseur
- Refroidisseur
- Pompe à chaleur à air
- Pompe à chaleur à eau

Notez que si nous autorisons le contact thermique entre les fluides chauds et froids, la direction naturelle du transfert de chaleur serait de la température la plus élevée vers la température la plus basse.

Une pompe à chaleur ne répond pas à notre définition d'un "dispositif simple de conversion d'énergie" qui comporte un transfert d'énergie à l'entrée et deux transferts à la sortie. Au contraire, une "pompe à chaleur simple" (illustrée ci-dessus) a deux transferts d'énergie à l'entrée et un à la sortie. Cependant, si la pompe à chaleur illustrée ci-dessus fonctionnait de manière régulière et en la considérant comme un CV, alors.. :

$$\dot{W} + \dot{Q}_c = \dot{Q}_h$$

Notez que le diagramme ci-dessus ne nous montre pas les "entrailles" de la pompe à chaleur. Une pompe à chaleur typique utilise un cycle de réfrigération à compression de vapeur pour accomplir sa fonction. Nous y reviendrons plus tard.

Coefficient de performance

Le terme utilisé pour relier l'avantage énergétique fourni par un HP à son coût énergétique est le "coefficient de performance" (COP), où l'avantage est généralement considéré comme l'un des flux de chaleur développés par le dispositif (\dot{Q}_c ou \dot{Q}_h) et le coût est le travail d'entrée (\dot{W}). Il convient de noter qu'il est possible (et typique) que $COP > 1$.

Général : $COP = \text{benefit} / \text{cost} \rightarrow \text{cost} = \text{benefit} / COP$

Fonction = refroidissement : $COP_c = \dot{Q}_c / \dot{W} \rightarrow \dot{W} = \dot{Q}_c / COP_c$

Fonction = chauffage : $COP_h = \dot{Q}_h / \dot{W} \rightarrow \dot{W} = \dot{Q}_h / COP_h$

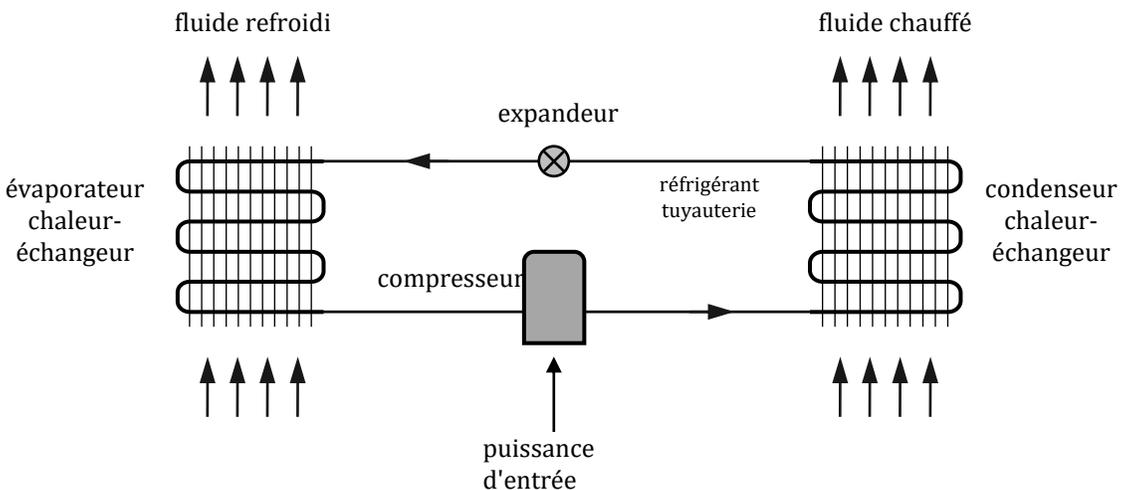
En unités métriques, le débit de chaleur et la puissance d'entrée peuvent être mesurés en utilisant les mêmes unités (par exemple W ou kW). Le COP est donc sans dimension.

Dans les unités I-P, le flux de chaleur est généralement indiqué en btu/h et la puissance d'entrée en W, et le rapport de ces termes n'est pas sans dimension. Dans ce cas, le terme "taux d'efficacité énergétique" (EER) est utilisé plutôt que COP, mais la signification est la même.

$$EER = \frac{\dot{Q} [\text{btu/hr}]}{\dot{W} [\text{watts}]}$$

A part :

Principaux composants d'un système de réfrigération par compression de vapeur



(Fin de l'aparté)

10. Capacité de l'équipement

Un dispositif ou une machine produisant de l'énergie aura une limite à son taux de production maximal soutenu. Nous appellerons cette limite la "capacité" de l'appareil.

En règle générale, il est possible pour un appareil de fournir une puissance moyenne dans le temps qui est inférieure à sa capacité (par exemple, par une commutation marche-arrêt ou d'autres moyens de modulation), mais la puissance maintenue ne peut pas dépasser sa capacité.

Certains appareils peuvent tolérer des charges brèves légèrement supérieures à leur capacité. Mais nous utiliserons le terme de capacité pour désigner la puissance maximale autorisée sur une base continue.

En général, la capacité est liée à la taille physique de l'appareil, et le coût de l'appareil augmente avec la capacité, bien que le coût ne soit pas nécessairement proportionnel à la capacité.

Exemples :	moteur électrique	5 cv 10 cv 20 cv
	Ménage	58 000 btu/hr
	Four	78 000 btu/hr 98 000 btu/hr
	Lampe électrique	450 lm (lumens) 800 lm 1500 lm
	Électrique	500 W
	plinthe	1000 W
	chauffage	1500 W

11. Pompes et ventilateurs

Dans les systèmes CVC, les pompes et les ventilateurs sont utilisés pour induire un mouvement de fluide à travers des conduits tels que des tuyaux et des gaines. Pour ces dispositifs, la puissance d'entrée est généralement fournie par un arbre rotatif.

Il est souvent raisonnable de considérer que la densité du fluide, l'énergie cinétique spécifique et l'énergie potentielle spécifique sont approximativement constantes à travers ces dispositifs. Dans ces conditions, la définition typique de l'efficacité d'une pompe ou d'un ventilateur est la suivante :

$$\eta = \frac{(P_2 - P_1) \cdot \dot{V}}{\dot{W}_{sh}} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\dot{W}_{sh}}$$

Ce résultat peut être réarrangé pour calculer la puissance d'entrée de l'appareil :

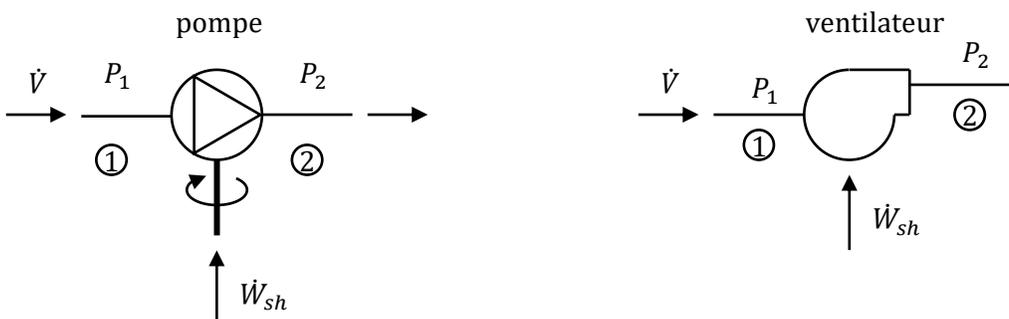
$$\dot{W}_{sh} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta} \quad \rightarrow \quad \text{input} = \frac{\text{output}}{\text{efficiency}}$$

Notez que le terme $\Delta P \cdot \dot{V}$ est parfois appelé "puissance utile du fluide". Les unités pour $\Delta P = Pa$ et $\dot{V} = m^3/s$, le produit de ces unités est W (watts) :

$$Pa \cdot \frac{m^3}{s} = \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m^3}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$$

Pour les applications de pompage, il peut être plus pratique d'utiliser $\Delta P [kPa]$, $\dot{V} [L/s]$:

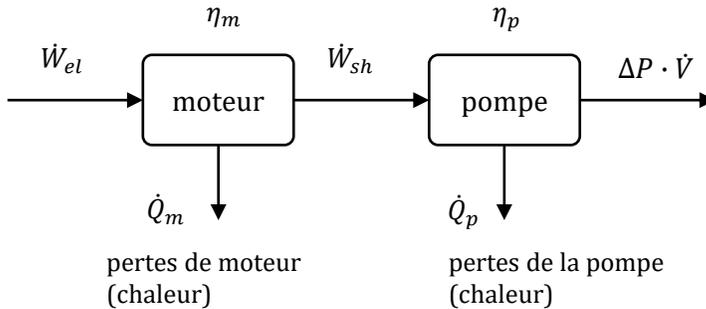
$$kPa \cdot \frac{L}{s} = kPa \cdot \frac{L}{s} \cdot \frac{1 m^3}{kL} = Pa \cdot \frac{m^3}{s} = W$$



12. Composants connectés en série

Les systèmes énergétiques comportent souvent des composants connectés en série, la sortie d'un composant fournissant l'entrée au composant suivant.

Prenons l'exemple d'un moteur qui entraîne une pompe, les arbres des deux dispositifs étant directement couplés. L'énergie disponible est l'électricité et la sortie souhaitée est la "puissance du fluide". Une fois que les deux arbres sont accouplés, ils se comportent effectivement comme un seul arbre (en supposant qu'il n'y ait pas de glissement dans l'accouplement).



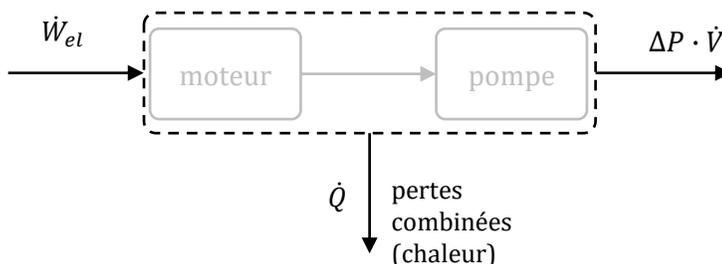
La puissance d'entrée requise pour la pompe est de

$$\dot{W}_{sh} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta_p}$$

La puissance d'entrée requise pour le moteur est la suivante

$$\dot{W}_{el} = \frac{\dot{W}_{sh}}{\eta_m} = \frac{1}{\eta_m} \left(\frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta_p} \right) = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta_m \cdot \eta_p}$$

Considérons un volume de contrôle dessiné autour du système de deux dispositifs (où la notation \dot{Q} est utilisée pour représenter les pertes totales du dispositif). L'arbre couplé est maintenant interne au système (c'est-à-dire qu'il ne représente pas un transfert d'énergie à travers la frontière du CV).

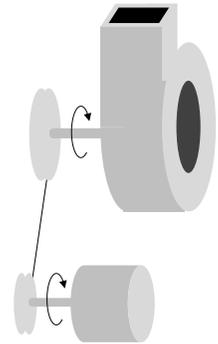


Le "rendement combiné" des appareils (η_c) est le suivant :

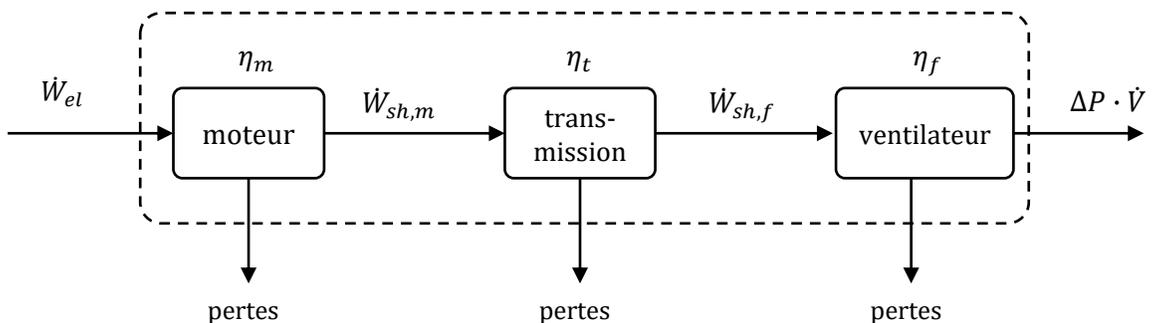
$$\eta_c = \left[\frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} \right]_{\text{système}} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\dot{W}_{el}} = \eta_m \cdot \eta_p$$

Si d'autres composants étaient ajoutés à la série, nous constaterions que l'efficacité combinée est le produit des efficacités des composants.

Prenons l'exemple d'un ventilateur centrifuge entraîné par un moteur dont les deux arbres sont reliés par une courroie et des poulies (c'est-à-dire une transmission mécanique). Il y a des pertes dans la transmission - la puissance de l'arbre fournie par le moteur ($\dot{W}_{sh,m}$) sera légèrement supérieure à la puissance de l'arbre fournie au ventilateur ($\dot{W}_{sh,f}$), c'est-à-dire $\dot{W}_{sh,m} > \dot{W}_{sh,f}$.



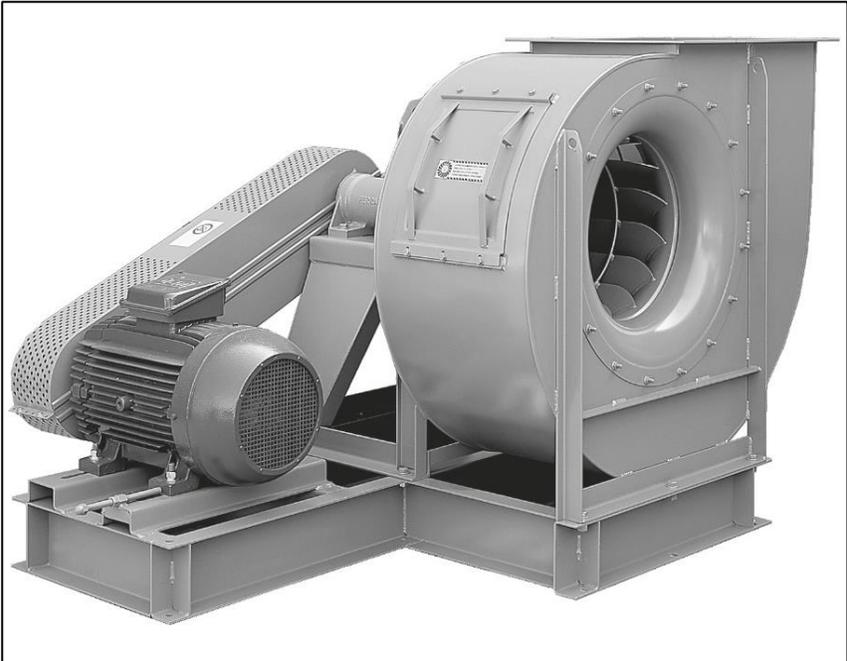
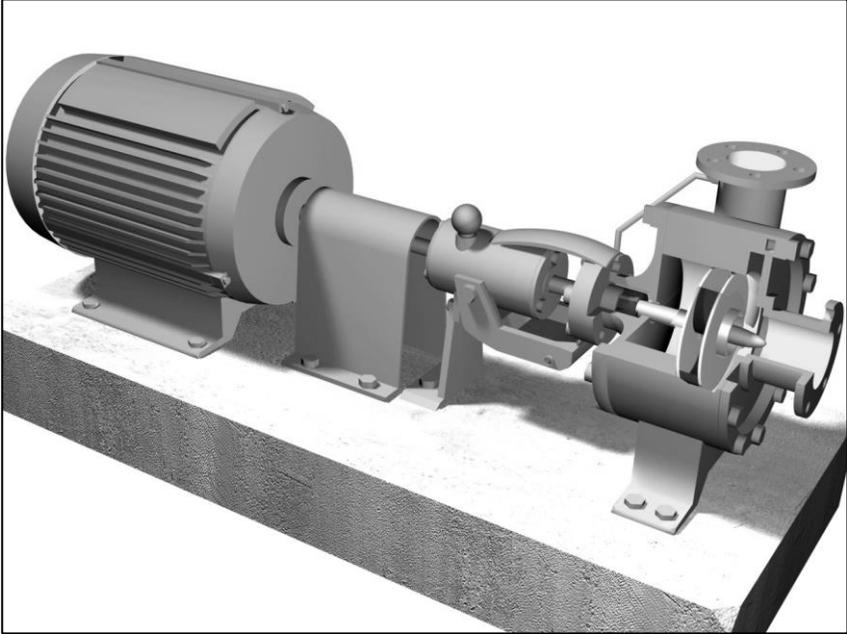
Le schéma ci-dessous montre un CV dessiné autour d'une série de trois composants.



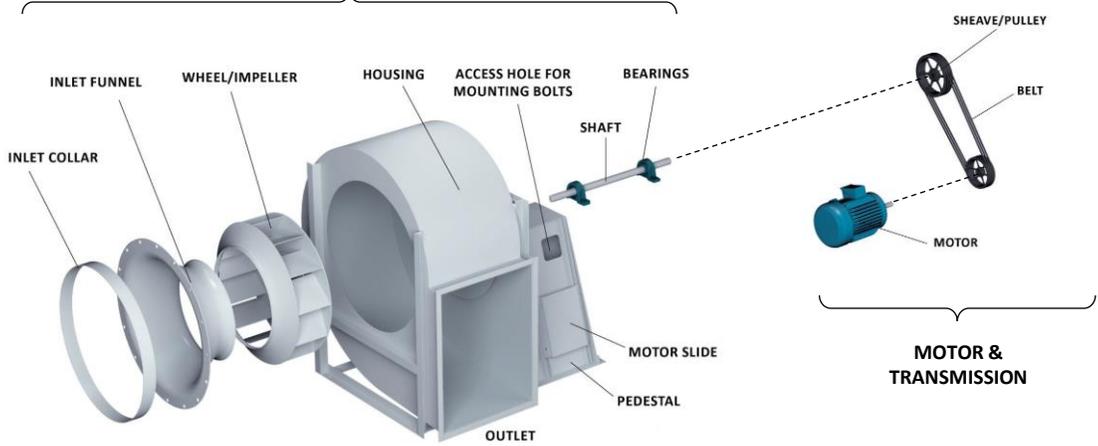
Combinaison des définitions de l'efficacité pour chaque composant :

$$\begin{aligned} \dot{W}_{el} &= \frac{\dot{W}_{sh,m}}{\eta_m} = \frac{1}{\eta_m} \left(\frac{\dot{W}_{sh,f}}{\eta_t} \right) = \frac{1}{\eta_m \cdot \eta_t} \left(\frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta_f} \right) \\ &= \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_f} \end{aligned}$$

$$\eta_c = \eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_f$$



VENTILATEUR CENTRIFUGE TYPIQUE



Diagrammes adaptés de Aerovent, <https://www.aerovent.com/products/centrifugal-fans/>

13. Rendement en régime permanent d'un four ou d'une chaudière à combustion

Les deux types d'appareils de combustion couramment utilisés pour le chauffage des locaux sont les *fourneaux* et les *chaudières*. En général, les fours chauffent l'air et les chaudières chauffent l'eau. (Remarque : le terme "chaudière" est souvent appliqué à un appareil de chauffage de l'eau, même si l'appareil ne fait pas réellement bouillir l'eau - il peut simplement augmenter le T de l'eau).

Fourneaux

Le terme "four" fait généralement référence à un appareil destiné à chauffer l'air et comprenant généralement un ventilateur pour faire circuler l'air dans l'appareil. Lorsque l'énergie primaire est un combustible qui est brûlé pour produire de la chaleur, on parle de "four à combustion". (Il existe également des "fours électriques", qui utilisent le chauffage par résistance électrique).

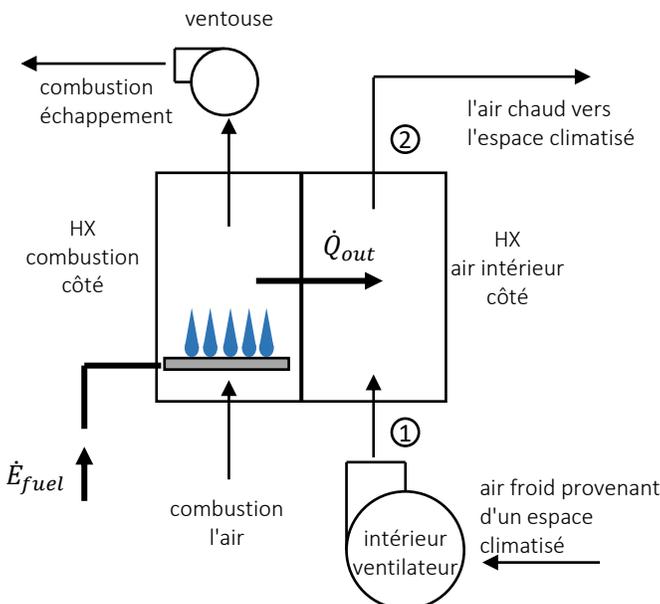
Dans un four à combustion, les principaux composants sont le ventilateur, le brûleur et l'échangeur de chaleur. Les chaudières modernes sont généralement équipées d'un ventilateur qui fait passer les gaz de combustion à travers l'échangeur de chaleur et les évacue à l'extérieur (on parle alors de chaudières à ventilation assistée).

Une définition simplifiée de l'efficacité d'un four en régime permanent est la suivante :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{E}_{fuel}}$$

\dot{Q}_{out} = taux de **production** de chaleur (taux de chaleur ajoutée au flux d'air intérieur par transfert de chaleur à travers l'échangeur de chaleur)

\dot{E}_{fuel} = taux d'**apport** de chaleur = taux de contenu calorifique du combustible



Par exemple :

$$\dot{E}_{fuel} = HV_v \cdot \dot{V}$$

$$\dot{Q}_{out} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} (h_2 - h_1)$$

Exemple d'évaluation d'un four :

entrée = 80 000 btu/hr

rendement = 74 000 btu/hr

$$\eta = \frac{74000}{80000} = 92.5\%$$

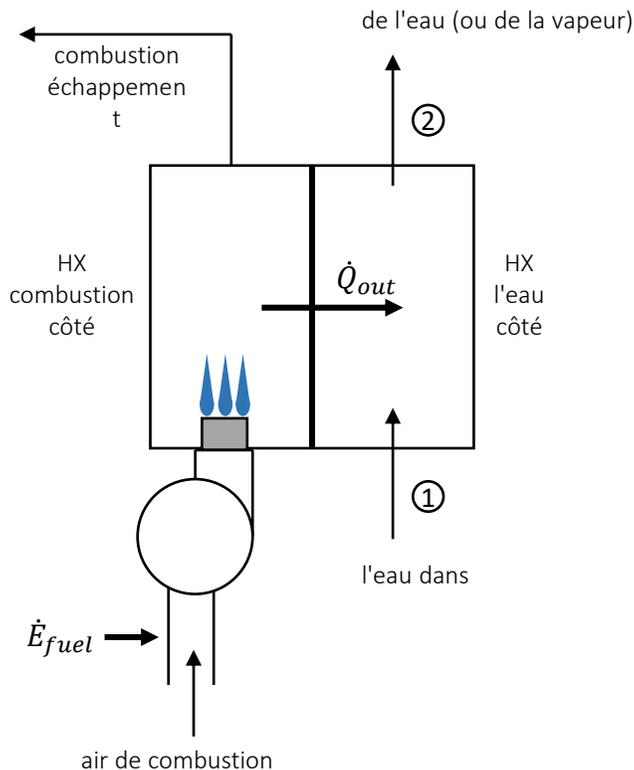
Chaudières

Le terme "chaudière" fait généralement référence à un dispositif permettant de chauffer de l'eau (pour le chauffage de locaux ou de processus), que l'eau bouille ou non. Dans une *chaudière à vapeur*, l'eau est transformée en vapeur. Dans une chaudière à *eau chaude*, la température de l'eau augmente mais elle ne se transforme pas en vapeur.

On peut considérer que la chaudière proprement dite se compose principalement d'un échangeur de chaleur et d'un brûleur. Une représentation simplifiée est fournie ci-dessous. (Remarque : dans une chaudière moderne, le flux de gaz à travers le côté combustion est généralement induit par un système de ventilateur. Toutefois, certains systèmes sont à "tirage naturel" du côté du gaz de combustion).

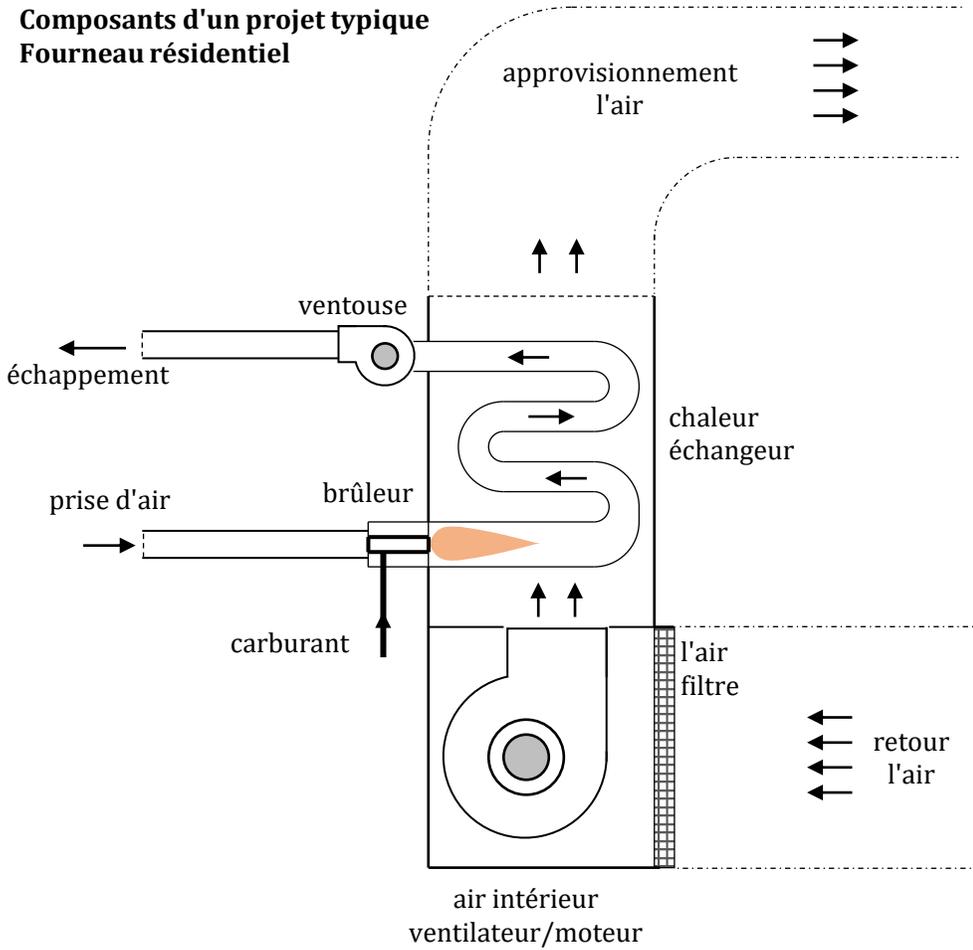
Une définition simplifiée du rendement d'une chaudière en régime permanent est la suivante :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{E}_{fuel}}$$



N'oubliez pas : L'aspect réel d'un échangeur de chaleur est généralement très différent de la représentation schématique simplifiée.

A part :



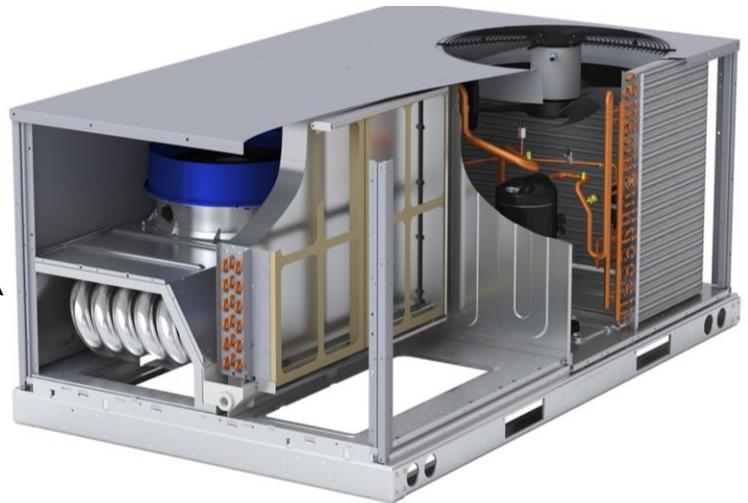
Rendement thermique = en régime permanent (valeur nominale)

EAUC = "Efficacité Annuelle d'Utilisation de Combustible"

Unité de toit typique
alimentée au gaz



section du four



Efficacité thermique (efficacité nominale en régime permanent)

Il existe une corrélation entre l'efficacité en régime permanent et l'efficacité réelle.

EAUC = efficacité en régime permanent - pertes en régime de veille (veilleuse + hotte à tirage ouvert) et pertes au démarrage et à l'arrêt.

Les chaudières modernes sont à tirage induit et n'ont pas de veilleuse; les pertes en mode veille sont donc minimales.

Exemple de notation des performances :

Capacity ratings (cont)

HEAT RATING TABLE — NATURAL GAS AND PROPANE

	GAS HEAT	AL/SS HEAT EXCHANGER		TEMPERATURE RISE (F)	THERMAL EFFICIENCY (%)	AFUE (%)	
		INPUT/OUTPUT STAGE 1 (MBH)	INPUT/OUTPUT STAGE 2 (MBH)				
Single Phase	04	LOW	—	65/53	25 - 55	82	81.0
		MED	—	90/73.5	45 - 85	82	81.2
		HIGH	—	—	—	—	—
	05	LOW	—	65/53	20 - 55	82	81.0
		MED	—	90/73.5	30 - 65	82	81.2
		HIGH	—	130/106	45 - 80	82	81.0
	06	LOW	—	65/53	15 - 55	82	81.0
		MED	—	90/73.5	25 - 65	82	81.2
		HIGH	—	130/106	35 - 80	82	81.0
	LOW	50/41	72/56	25 - 25	82	—	

Exemple : Composants d'une chaudière à condensation



Table 1.7 Typical seasonal efficiencies for various boiler types⁽¹²⁾

Boiler/system	Seasonal efficiency / %
Condensing boilers:	
— under-floor or warm water system	90
— standard size radiators, variable temperature circuit (weather compensation)	87
— standard fixed temperature emitters (83/72 °C flow/return)*	85
Non-condensing boilers:	
— modern high-efficiency non-condensing boilers	80–82
— good modern boiler design closely matched to demand	75
— typical good existing boiler	70
— typical existing oversized boiler (atmospheric, cast-iron sectional)	45–65

* Not permitted by current Building Regulations

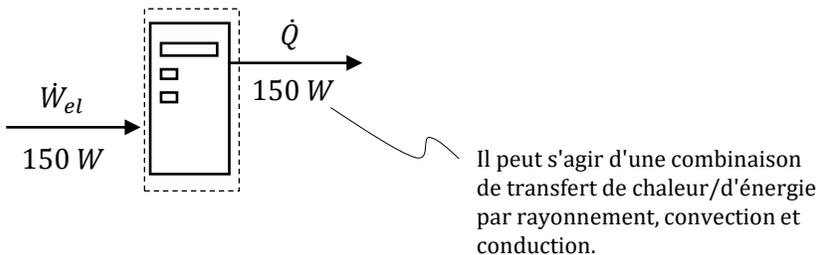
"Guide B de la CIBSE : Chauffage, ventilation, climatisation et réfrigération".
The Chartered Institution of Building Services Engineers Londres, 2005.

14. Conversion du travail en chaleur

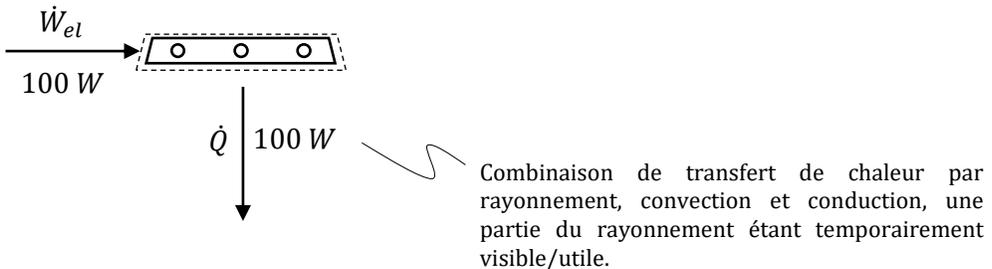
Prenons l'exemple d'un appareil électrique fonctionnant dans un espace climatisé. Cette consommation d'électricité peut avoir un impact sur la consommation d'énergie du bâtiment d'au moins deux façons :

1. Consommation directe d'électricité de l'appareil
2. En général, l'énergie "utilisée" par l'appareil devient un gain de chaleur dans un espace et a donc un impact sur les charges de CVC et la consommation d'énergie.

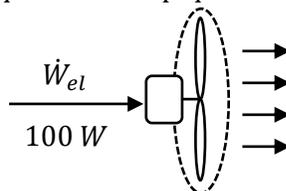
Par exemple, une tour d'ordinateur de bureau "utilise" régulièrement 100 W d'électricité. Ces 100 W ont temporairement un effet "utile", mais peu de temps après, l'énergie est convertie en chaleur.



Il en va de même si l'appareil est une lampe électrique (luminaire) utilisant 100 W :

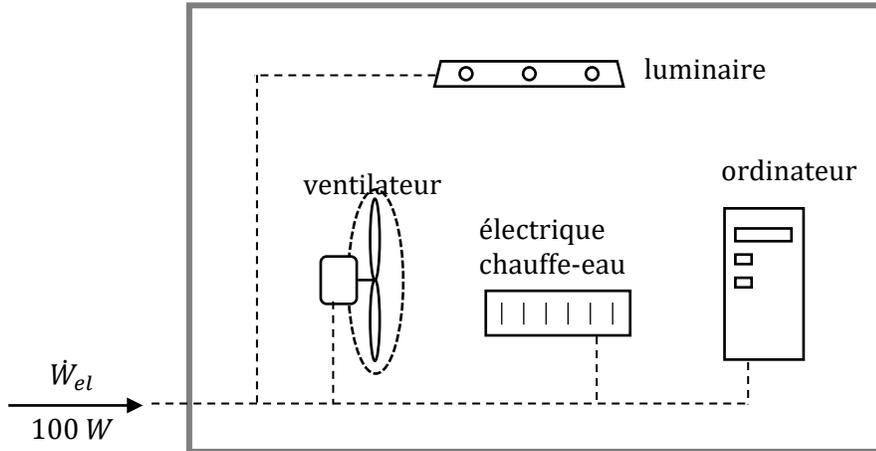


Un ventilateur électrique ? Lorsqu'il fonctionne, il produit temporairement un mouvement de fluide organisé (énergie cinétique macroscopique), mais celui-ci est constamment converti en énergie cinétique microscopique aléatoire (chaleur).

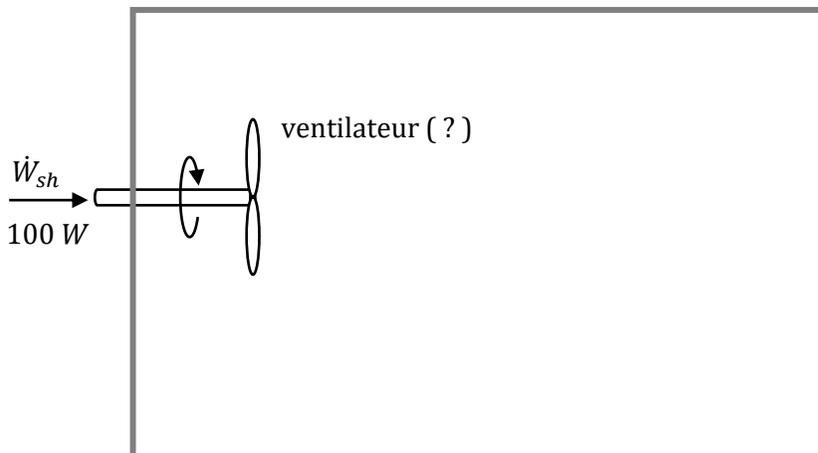


Pour tout appareil fonctionnant et recevant un apport électrique = 100 W, le taux d'énergie gagné (c'est-à-dire la chaleur) par la pièce en régime permanent est de 100 W.

(Remarque : si l'appareil ne fonctionne pas de manière régulière, il peut y avoir un décalage entre le moment où l'électricité est consommée et le moment où le gain de chaleur se produit dans la pièce).



Et si le transfert d'énergie à travers la frontière se faisait par la puissance de l'arbre ? Le taux de gain d'énergie est toujours de 100 W.



Nous reviendrons sur ce sujet plus tard.