

Energie et Exergie

L'embryon d'une base théorique ...
de décembre 2023 à mars 2024

Gilbert Morand

1 Questions qui dérangent et définitions

- Efficace ou efficient ? la mouche, le trafiquant d'eau chaude, PAC et CAD, rendement exergetique ?

2 Thermodynamique : principes et définitions de base

- Energie, exergie, entropie et relations entre ces grandeurs
- Analogie thermo-mécanique-géométrique : application et exemples
- Analogie avec la mécanique
- Manière de voir l'exergie

1 Questions qui dérangent et définitions

- Efficace ou efficient ? la mouche, le trafiquant d'eau chaude, PAC et CAD, rendement exergetique ?

2 Thermodynamique : principes et définitions de base

- Energie, exergie, entropie et relations entre ces grandeurs
- Analogie thermo-mécanique-géométrique : application et exemples
- Analogie avec la mécanique
- Manière de voir l'exergie

1 Questions qui dérangent et définitions

- Efficace ou efficient ? la mouche, le trafiquant d'eau chaude, PAC et CAD, rendement exergétique ?

2 Thermodynamique : principes et définitions de base

- Energie, exergie, entropie et relations entre ces grandeurs
- Analogie thermo-mécanique-géométrique : application et exemples
- Analogie avec la mécanique
- Manière de voir l'exergie

1 Questions qui dérangent et définitions

- Efficace ou efficient ? la mouche, le trafiquant d'eau chaude, PAC et CAD, rendement exergétique ?

2 Thermodynamique : principes et définitions de base

- Energie, exergie, entropie et relations entre ces grandeurs
- Analogie thermo-mécanique-géométrique : application et exemples
- Analogie avec la mécanique
- Manière de voir l'exergie

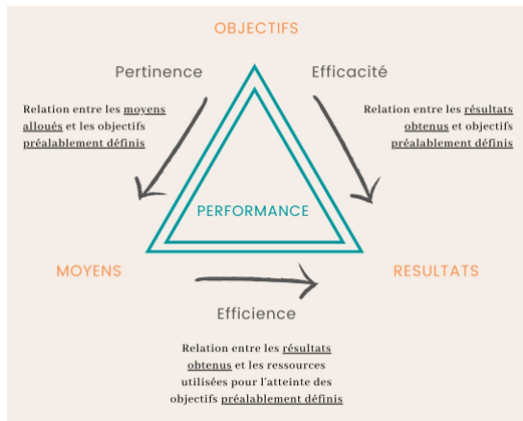
1 Questions qui dérangent et définitions

- Efficace ou efficient ? la mouche, le trafiquant d'eau chaude, PAC et CAD, rendement exergetique ?

2 Thermodynamique : principes et définitions de base

- Energie, exergie, entropie et relations entre ces grandeurs
- Analogie thermo-mécanique-géométrique : application et exemples
- Analogie avec la mécanique
- Manière de voir l'exergie

- Energie, rendement énergétique, efficacité énergétique
- Exergie, rendement exergetique, efficience énergétique
- Entropie, énergie, exergie, enthalpie
- Flux énergétique, Pinch analysis (pincement), diagramme de Sankey, analyse énergétique et exergetique, efficacité et efficience, analyse systématique, systémique.



Tuer une mouche
avec un canon ?

- Efficace : **oui** !
- Efficient : **non** !

Modèle de performance de Gibert (1980)

Mélanger de l'eau froide avec de l'eau chaude ?

Ce n'est pas bien ! Mais pourquoi ?

- Perd de l'énergie (quantité) ? **Non**
- Perd de l'exergie (qualité) ? **Oui**

**Mélanger de l'eau chaude avec de l'eau froide,
c'est détruire de l'exergie.**

Comment interpréter le rendement d'un système de distribution de chaleur ?

Un système de distribution, c'est mélanger du chaud et du froid.
C'est un échangeur !

- Rendement énergétique (quantité) ? **100%**
- Rendement exergétique (qualité) ? **$\ll 100\%$**

COP d'une PAC

Est-ce dérangentant que le COP d'une pompe à chaleur
(assignable à un rendement)
soit plus grand que 1.

$$\text{Rendement énergétique : } COP_{en} = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \approx 300\%$$

$$\text{Rendement exergetique : } \eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} = COP_{en} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}_{\text{« bras de levier »}} \approx 30\%$$

Je suis alimenté par un CAD à 80°C .

Je baisse ma consigne de température intérieure (T).

Je consomme moins d'énergie : **oui**.

Je consomme moins d'exergie : **oui**.

Explication :

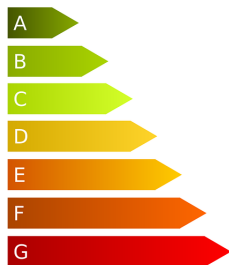
Demande en énergie d'un bâtiment

L'énergie de chauffage E pour garder l'intérieur d'un bâtiment à la température T est proportionnelle à la différence entre la température intérieure T et extérieure T_0 :

$$E = k \cdot (T - T_0)$$

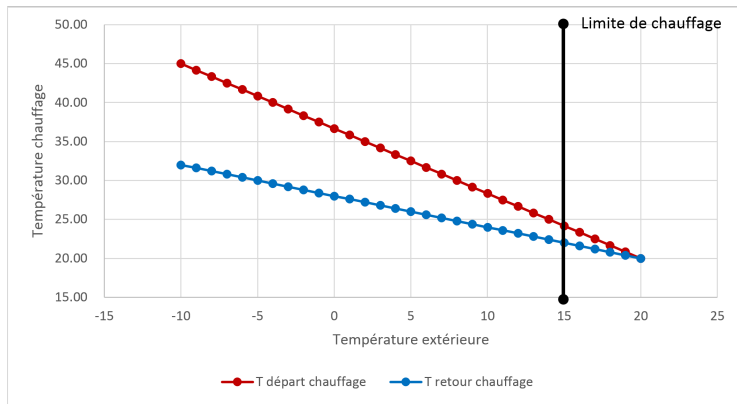
L'énergie produite à l'intérieure du bâtiment s'échappe par

- conduction à travers l'enveloppe
- convection par renouvellement d'air



Stratégie de régulation thermique d'un bâtiment

La stratégie de régulation de chauffage suit la loi d'eau.



Effet sur la demande en énergie et en exergie par la variation de la valeur de consigne (T) ?

Effet sur l'énergie : $E = k \cdot (T - T_0)$

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial T} = \frac{k}{k \cdot (T - T_0)} = \frac{1}{T - T_0}$$

Effet sur l'exergie : $E_{ex} = E \cdot \theta$

$$\frac{1}{E_{ex}} \cdot \frac{\partial E_{ex}}{\partial T} = \frac{1}{E_{ex}} \cdot k \cdot \theta \cdot (1 + \frac{T_0}{T}) = \frac{1}{T} \cdot \frac{T + T_0}{T - T_0} \approx \frac{2}{T - T_0}$$

T	T_0	Effet sur l'énergie	Effet sur l'exergie
20	0	5.0%	9.6 %
20	5	6.7%	13.0 %
20	10	10.0%	19.6 %

Effet sur la demande en énergie et en exergie par la variation de la valeur de la température extérieure (T_0) ?

Effet sur l'énergie : $E = k \cdot (T - T_0)$

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial T_0} = \frac{k}{k \cdot (T - T_0)} = \frac{-1}{T - T_0}$$

Effet sur l'exergie : $E_{ex} = E \cdot \theta$

$$\frac{1}{E_{ex}} \cdot \frac{\partial E_{ex}}{\partial T_0} = \frac{-2}{T - T_0}$$

T	T_0	Effet sur l'énergie	Effet sur l'exergie
20	0	-5.0%	-10 %
20	5	-6.7%	-13.3 %
20	10	-10.0%	-20.0 %

Mais où se cache le bug ?

Plus la température du condenseur de la PAC est haute, plus je détruis d'exergie. Alors pourquoi ?

- Le rendement de la production de chaleur avec un brûleur à gaz ou à mazout, n'est pas dépendant des températures (de l'environnement et de la partie chaude) comme avec une pompe à chaleur !
- Le rendement exergétique de la distribution ne doit pas être compté dans le rendement global dans le cas d'utilisation d'un brûleur à gaz ou à mazout.

- Exergie, énergie, enthalpie, entropie : définitions et relations
- Analogie avec la mécanique : la force et le moment de force
- Exergie produite (détruite) par une pompe à chaleur, un moteur, un échangeur, une machine de froid

Exergie : c'est quoi ?

C'est l'énergie **utile** d'un système

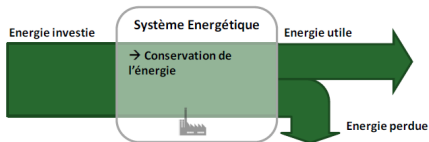
L'énergie est dite « **utile** » si elle est entièrement **transformable** par un système idéal (sans pertes) en n'importe quelle autre forme d'énergie.

- Lors de toute transformation, de l'exergie est détruite.
- Equivalent au deuxième principe de thermodynamique.
- L'exergie est lié à l'entropie et à l'enthalpie.

Energie et Exergie

A haute température, l'exergie et l'énergie sont confondues.

L'énergie d'un système est conservée

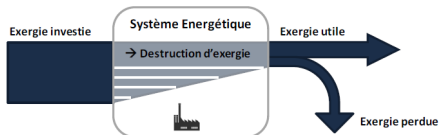


Première loi de thermodynamique •

l'entropie d'un système fermé augmente

≡

la chaleur va du chaud vers le froid

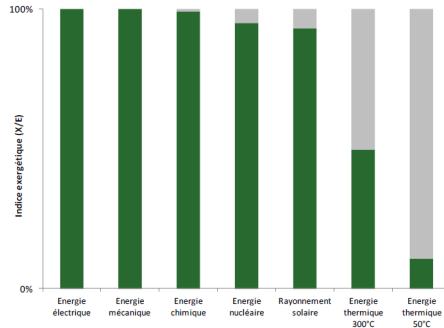


• Deuxième loi de thermodynamique

Quantité •

• Qualité

Indice exergétique



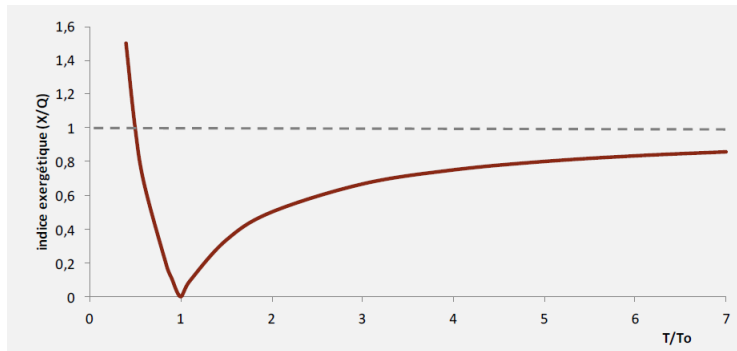
L'énergie électrique et l'énergie mécanique sont des formes d'énergie de très haute « qualité ».

Leur indice exergétique est de 100%, dans ce cas, l'exergie est égale à l'énergie.

A l'inverse, la qualité de l'énergie thermique est variable, et d'autant plus faible que le niveau de température à laquelle elle est disponible est bas.

Analogie

L'indice exergétique est similaire au bras de levier



- L'environnement est à une température T_0 en Kelvin
- L'élément étudié est à la température T en Kelvin

Analogie entre la mécanique et la thermodynamique

Analogie

Energie	$\longleftrightarrow$	Force
Exergie	$\longleftrightarrow$	Moment de Force

première loi de thermo	$\longleftrightarrow$	équilibre : somme des forces est nulle
deuxième loi de thermo	$\longleftrightarrow$	équilibre : somme des moments est nulle

Rendement exergetique (η_{ex}) d'une pompe à chaleur

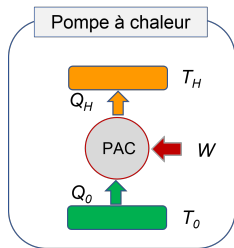
$$cop_{en} = \frac{Q_{out}}{W_{el}} \approx 3$$

$$\eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{Q_{out} \cdot (1 - \frac{T_0}{T})}{W_{el} + Q_{in} \cdot (1 - \frac{T_0}{T_0})} = \frac{Q_{out} \cdot (1 - \frac{T_0}{T})}{W_{el}} = cop_{en} \cdot \underbrace{(1 - \frac{T_0}{T})}_{\text{« bras de levier »}} \approx 30\%$$

Bras de levier exergetique (facteur de Carnot θ)

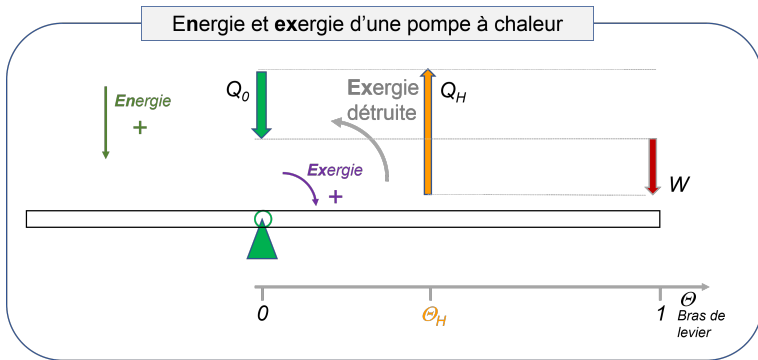
« Bras de levier » [-]	T_0 °C(K)	T °C(K)
0.10	0 (273)	30 (303)
0.15	0 (273)	50 (323)
0.23	0 (273)	80 (353)
-0.15	-18 (255)	20 (293)

Energie et exergie pour une pompe à chaleur (PAC) : vue mécanique



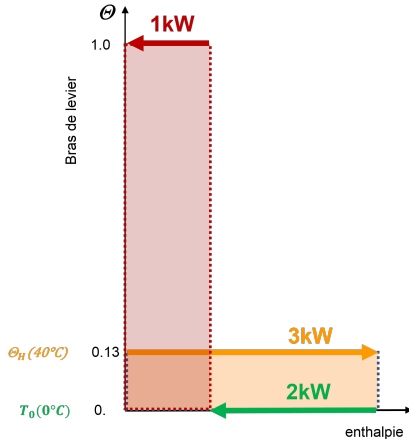
«Bras de levier»

$$\Theta_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$



Analogie mécanique	Equations	Thermodynamique
Equilibre des Forces	$-Q_H + Q_0 + W = 0$	1 ^{ère} loi de thermo
Equilibre des Moments	$-Q_H \cdot \Theta_H + W - Ex_{détruite} = 0$	2 ^{ème} loi de thermo

Coefficient de performance (COP) et rendement exergetique ($\eta_{exergetique}$) pour une pompe à chaleur (PAC) : vue géométrique



Coefficient de performance

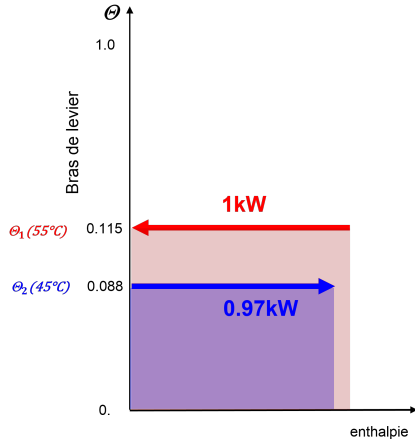
- $COP = \frac{3kW}{1kW} = 3[]$

Rendement exergetique

- $\eta_{exergetique} = \frac{\text{rectangle jaune}}{\text{rectangle rouge}}$

$$\eta_{exergetique} = COP \cdot 0.13 = 0.39[]$$

Rendement énergétique et exergetique ($\eta_{exergetique}$) d'un échangeur



Rendement énergétique

- $\eta_{energetique} = \frac{0.97\text{ kW}}{1\text{ kW}} = 0.97[]$

Rendement exergetique

- $\eta_{exergetique} = \frac{\text{rectangle bleu}}{\text{rectangle rouge}}$

$$\eta_{exergetique} = \frac{0.97\text{ kW} \cdot 0.088}{1\text{ kW} \cdot 0.115} = 0.74[]$$

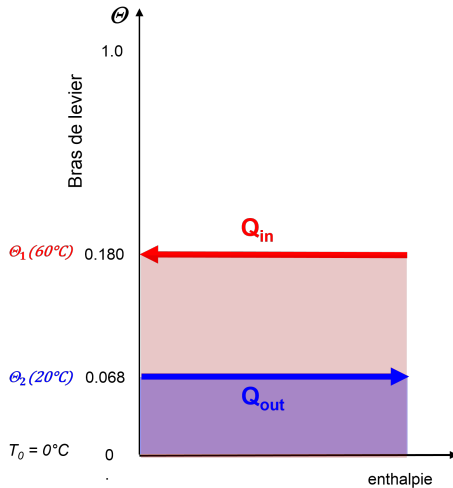
Rendement exergétique (η_{ex}) d'un réseau de chaleur à distance

- η_{en} : rendement énergétique
 η_{ex} : rendement exergétique
 Q_{in} : chaleur fournie par le réseau de chaleur à distance
 Q_{out} : chaleur reçue par le bâtiment
 T_{cad} : température du réseau de chaleur à distance

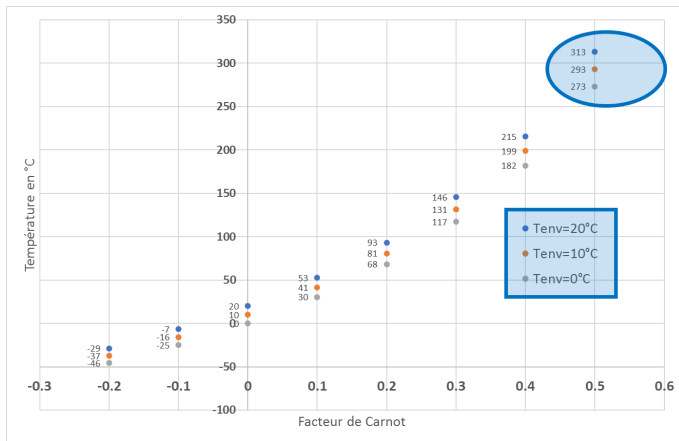
$$\eta_{en} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \approx 100\%$$

$$\eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{Q_{out} \cdot (1 - \frac{T_0}{T})}{Q_{in} \cdot (1 - \frac{T_0}{T_{cad}})} = \frac{(1 - \frac{T_0}{T})}{(1 - \frac{T_0}{T_{cad}})} \approx 38\%$$

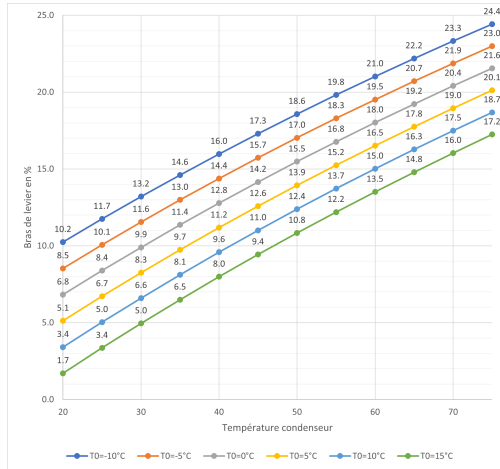
Rendement exergetique et énergétique pour le CAD sous forme de graphique



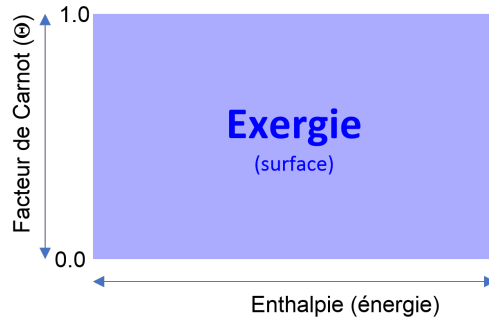
Le facteur de Carnot



Bras de levier, et température du condenseur



Exergie, facteur de Carnot et Energie (Enthalpie)



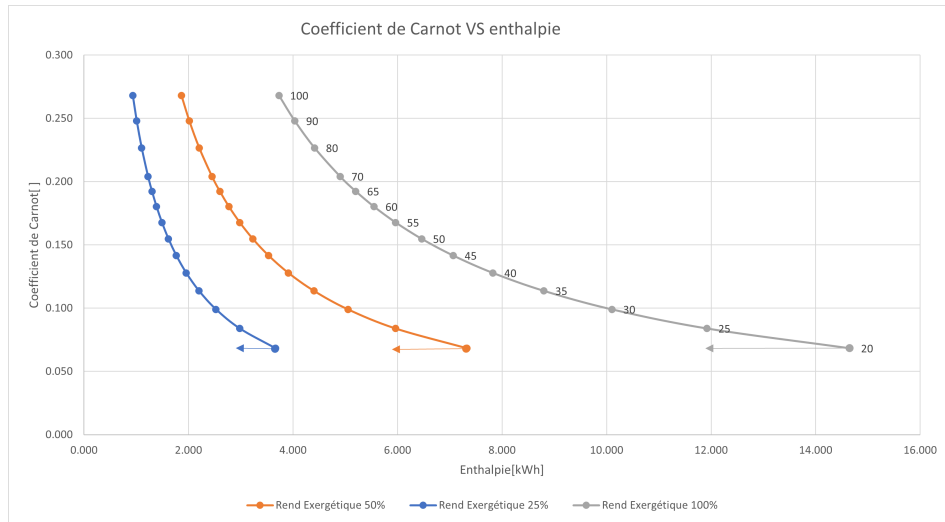
Exergie, facteur de Carnot et Energie (Enthalpie)



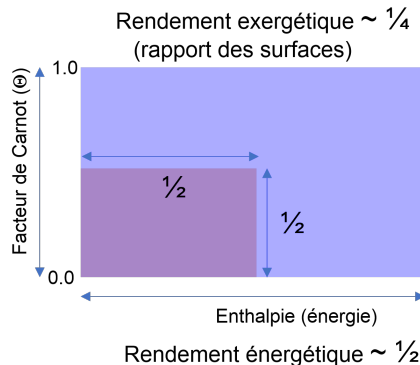
$$\eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} \leq 1$$

- Durant une transformation, l'exergie ne peut que diminuer (l'entropie ne peut qu'augmenter).
- L'exergie est définie à partir de l'enthalpie (énergie) des niveaux de température du processus et de l'environnement).

Exergie, facteur de Carnot et Energie (Enthalpie)



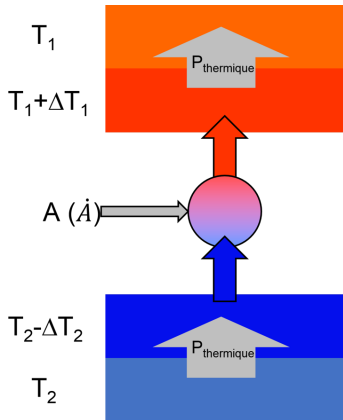
Exergie, facteur de Carnot et Energie (Enthalpie)



Rendement énergétique et exergétique

A haute température, le rendement exergétique et énergétique sont confondus.

Réduction du COP quand la PAC ne fonctionne pas à sa puissance nominale



- Une PAC comporte 2 échangeurs (froid et chaud)
- Les échangeurs sont dimensionnés pour des plages de température

Exemple d'actualité

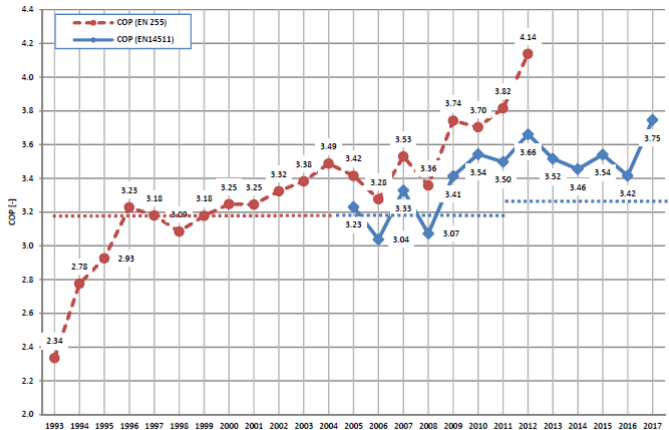


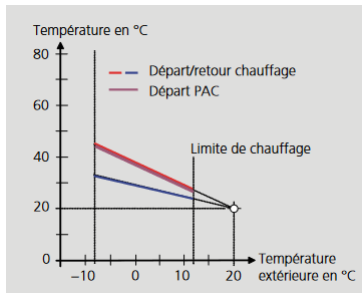
Abb. 1.1: COP-Entwicklung der Luft/Wasser-Wärmepumpe seit 1993

La norme EN 14511 décrit la manière de mesurer les performances d'une PAC air-eau

- Plus la température en sortie de la PAC est haute, moins elle détruit d'exergie (plus l'exergie transformée est grande).
- EN 14511 correspond à A2/W35. Le facteur de Carnot vaut ($\theta = 0.107$).
- Le rendement exergétique d'une PAC ($\eta_{ex} = 0.4$) est considéré comme constant (indépendant des températures en jeu).

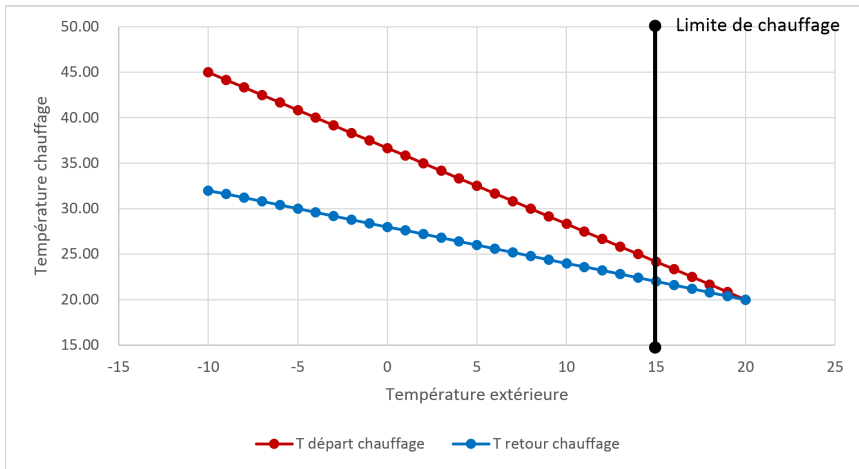
Année	COP (A2W35)	θ (A2W35)	η_{ex}
2012	3.66	0.107	0.39
2015	3.54	0.107	0.38
2016	3.42	0.107	0.36
2017	3.75	0.107	0.40

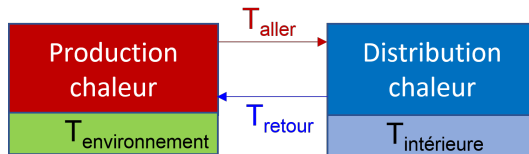
Gestion et régulation du confort thermique



La norme EN 14511 A2/W35. Facteur de Carnot ($\theta=0.107$)

Gestion et régulation du confort thermique





$$\eta_{\text{ex}}(\text{global}) = \eta_{\text{ex}}(\text{production}) \cdot \eta_{\text{ex}}(\text{distribution})$$

$$\eta_{\text{ex}}(\text{Distribution}) = \frac{\theta(T_{\text{intérieure}})}{\theta(T_{\text{départ}})}$$

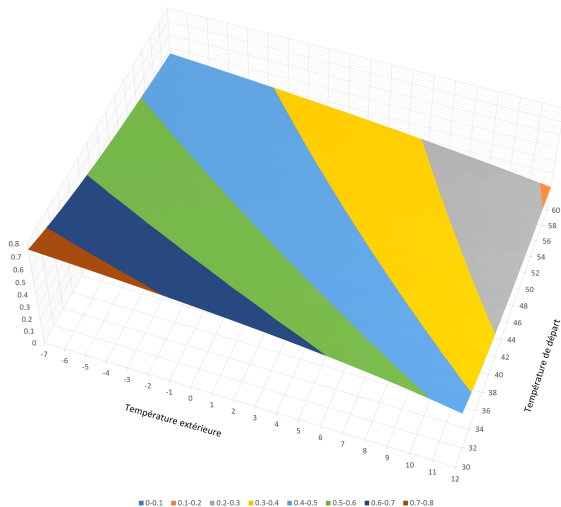
- Le rendement exergetique $\eta_{\text{ex}}(\text{Distribution})$ est dépend peu de la température de l'environnement ($T_{\text{environnement}}$)

Dépendance du rendement de la distribution en fonction de la température de l'environnement

$$\eta_{\text{ex}}(\text{Distribution}) = \frac{\theta(T_{\text{intérieure}})}{\theta(T_{\text{départ}})}$$

$$\eta_{\text{ex}}(\text{Distribution}) = \frac{T_{\text{intérieure}} - T_0}{T_{\text{départ}} - T_0} \cdot \frac{T_{\text{départ}}}{T_{\text{intérieure}}}$$

Rendement exergetique de la distribution en fonction des température extérieure et de départ



Vérités et paradoxes ?

$T_{intérieure}$ °C	T_{aller} [°C]	$\eta_{ex}(prod)$ []	$\theta(T_{aller})$ []	$COP = \frac{\eta_{ex}}{\theta}$	$\eta_{ex}(dist) = \frac{\theta(T_{int})}{\theta(T_{aller})}$	$\eta_{ex}(global) = \eta_{ex}(prod) \cdot \eta_{ex}(dist)$
30	35	0.4	0.1136 0.0811	3.52 4.93	0.871 0.813	0.35 0.32
30	60	0.4	0.1801 0.1501	2.22 2.66	0.549 0.439	0.22 0.18
20	35	0.4	0.1136 0.0811	3.52 4.93	0.600 0.420	0.24 0.17
20	60	0.4	0.1801 0.1501	2.22 2.66	0.378 0.227	0.15 0.09

$T_{environnement} = 0\text{ °C}$ $\theta_{int}(20\text{ °C}) = 0.0682$ $\theta_{int}(30\text{ °C}) = 0.0990$ env. froid

$T_{environnement} = 10\text{ °C}$ $\theta_{int}(20\text{ °C}) = 0.0341$ $\theta_{int}(30\text{ °C}) = 0.0660$ env. chaud

- de l'énergie thermique à une température plus haute que la température de l'environnement contient de l'exergie (a de la valeur).
- de l'énergie thermique à une température plus basse que la température de l'environnement contient de l'exergie (a de la valeur) [la valeur réside dans l'absence].
- ce qui fait la valeur de l'énergie thermique, c'est la différence de température de cette énergie et la température de l'environnement.

- Chauffage (isolation de l'enveloppe, distribution basse température)
- ECS (boucle de circulation)
- Renouvellement d'air (échangeur double flux, puits canadiens)

U_{moy}
 U_{moy} renouvellement d'air

Rendement énergétique et exergétique

A haute température, le rendement exergétique et énergétique sont confondus.

Exergie, énergie, enthalpie, facteur de Carnot, rendement exergetique

Exergie [kWh] $\eta_{exerg}=1.0$	Enthalpie [kWh] $\eta_{exerg}=0.5$	Enthalpie [kWh] $\eta_{exerg}=0.25$	Facteur de Carnot []	Température [°C]
1.00	0.50	0.25	1.000	∞
3.73	1.865	0.933	0.268	100
4.41	2.206	1.103	0.227	80
5.55	2.775	1.388	0.180	60
6.46	3.230	1.615	0.155	50
7.83	3.913	1.956	0.128	40
10.10	5.050	2.525	0.099	30
14.65	7.325	3.663	0.068	20

$$T_{\text{environnement}} = 0^{\circ}\text{C}$$

Exergie, énergie, enthalpie, facteur de Carnot, rendement exergetique

Exergie [kWh] $\eta_{exerg}=1.0$	Enthalpie [kWh] $\eta_{exerg}=0.5$	Enthalpie [kWh] $\eta_{exerg}=0.25$	Facteur de Carnot []	Température [°C]
1.00	0.50	0.25	1.000	∞
5.55	2.775	1.388	0.180	60
5.96	2.982	1.491	0.168	55
11.92	5.960	2.980	0.084	25
14.65	7.325	3.663	0.068	20

$$T_{\text{environnement}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Effet de 18% à 20 °C
- Effet de 7% à 55 °C

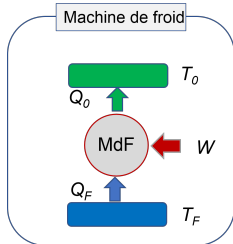
Exergie, énergie, enthalpie, facteur de Carnot, rendement exergetique

Exergie $\eta_{exerg}=1.0$ [kWh]	Exergie $\eta_{exerg}=1.0$ [kWh]	Facteur de Carnot []	Facteur de Carnot []	Température « chaude » [°C]	Perte relative d'exergie [%]
$T_{env} = 0 \text{ °C}$	$T_{env} = -5 \text{ °C}$	$T_{env} = 0 \text{ °C}$	$T_{env} = -5 \text{ °C}$		
1	1	1	1	∞	0
3.73	3.55	0.268	0.282	100	4.8
4.41	4.15	0.227	0.241	80	5.9
5.55	5.12	0.180	0.195	60	7.7
6.46	5.87	0.155	0.170	50	9.1
7.83	6.96	0.128	0.144	40	11.1
10.10	8.66	0.099	0.116	30	14.3
14.65	11.72	0.068	0.085	20	20.0

Transfert de chaleur implique un ΔT

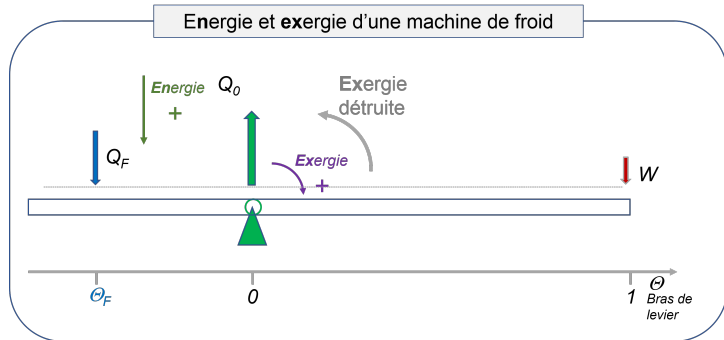
Théoriquement $T_{env.} = 0 \text{ °C}$, pratiquement , $T_{env.} = 0 - \Delta T = -5 \text{ °C}$

Energie et exergie pour une machine de froid (MdF)



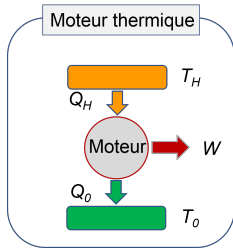
«Bras de levier»

$$\Theta_F = \left(1 - \frac{T_0}{T_F}\right)$$



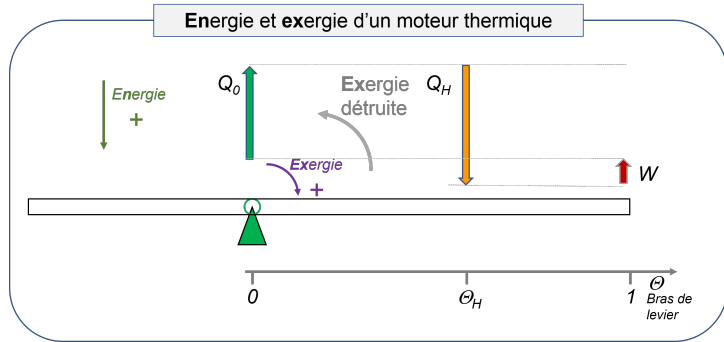
Analogie mécanique	Equations	Thermodynamique
Equilibre des Forces	$Q_F - Q_0 + W = 0$	1^{ère} loi de thermo
Equilibre des Moments	$-Q_F \cdot \Theta_F + W - Ex_{détruite} = 0$	2^{ème} loi de thermo

Energie et exergie pour un moteur thermique



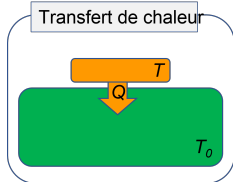
«Bras de levier»

$$\theta_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$



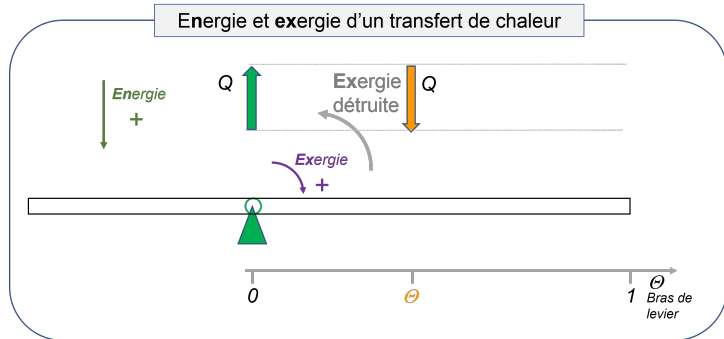
Analogie mécanique	Equations	Thermodynamique
Equilibre des Forces	$Q_H - Q_0 - W = 0$	1 ^{ère} loi de thermo
Equilibre des Moments	$Q_H \cdot \theta_H - W - Ex_{détruite} = 0$	2 ^{ème} loi de thermo

Energie et exergie pour un transfert thermique dans l'environnement



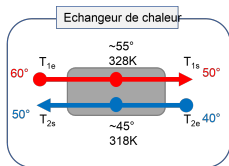
«Bras de levier»

$$\Theta_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$



Analogie mécanique	Equations	Thermodynamique
Equilibre des Forces	$Q - Q = 0$	1 ^{ère} loi de thermo
Equilibre des Moments	$Q \cdot \theta - Ex_{détruite} = 0$	2 ^{ème} loi de thermo

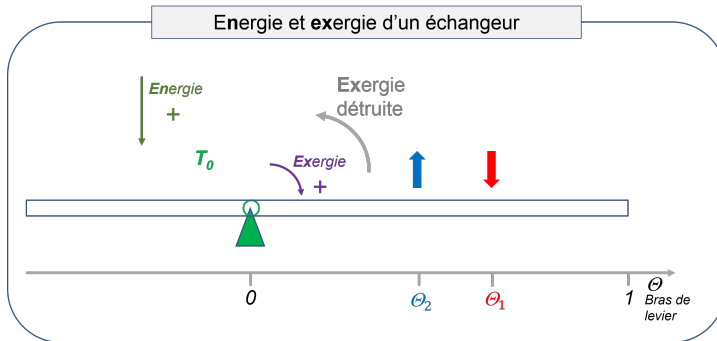
Energie et exergie pour un échangeur thermique



«Bras de levier»

$$\theta_1 = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) = 0.115$$

$$\theta_2 = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) = 0.088$$



Analogie mécanique	Equations	Thermodynamique
Equilibre des Forces	$Q - Q = 0$	1 ^{ère} loi de thermo
Equilibre des Moments	$Q \cdot \theta_1 + Q \cdot \theta_2 - Ex_{détruite} = 0$	2 ^{ème} loi de thermo

Définition des grandeurs

Dénomination	Notation	Unité
• Enthalpie	H	J
• Exergie	X	J
• Entropie	S	J/K
Chaleur	Q	J
Température	T	K

$$X = H - T \cdot S$$

$$dS = \frac{dQ_{\downarrow}}{T}$$

Pour une processus de transformation, on a :

$$\Delta X = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

Pour tout système fermé, même si l'énergie (enthalpie) est conservée, l'entropie du système augmente, et donc, l'exergie diminue.

$$\Delta X = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$\Delta X = (0) - T_0 \cdot \left(\frac{Q}{T} - \frac{Q}{T_0} \right)$$

$$\Delta X = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

- Q est comparable à la force.
- $\left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$ est comparable au bras de levier.
- X est comparable à un moment de force.

« La chaleur va du chaud vers le froid »

« L'entropie d'un système fermé ne peut qu'augmenter »

Deux objets sont mis en contact. On observe les variations de température

Description	Masse	Chaleur spécifique	Température initiale	Variation de température
Objet chaud	m_1	c_1	T_{chaud}	dT_1
Objet froid	m_2	c_2	T_{froid}	dT_2

La conservation de l'énergie :

$$c_1 m_1 dT_1 + c_2 m_2 dT_2 = 0 \quad dT_2 = -\frac{c_1 m_1}{c_2 m_2} dT_1$$

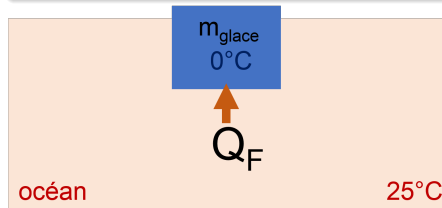
$$dS_1 = c_1 m_1 \frac{dT_1}{T_{chaud}} \quad \text{et} \quad dS_2 = c_2 m_2 \frac{dT_2}{T_{froid}} = -c_1 m_1 \frac{dT_1}{T_{froid}}$$

$$dS = dS_1 + dS_2 = c_1 m_1 \left(\frac{1}{T_{chaud}} - \frac{1}{T_{froid}} \right) dT_1$$

Exemple de calcul sur l'entropie

mettre de la glace dans de l'eau

Un récipient contient 10 kg de glace à 0°C . On le plonge dans un lac à 25°C et on attend que toute la glace se soit transformée en eau à 0°C .
Calculer l'accroissement d'entropie subi par le monde lors de la fonte de la glace.



$$Q_F = m \cdot L_f$$
$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{glace}} + \Delta S_{\text{eau}} = + \frac{m \cdot L_f}{T_{\text{froid}}} - \frac{m \cdot L_f}{T_{\text{chaud}}} > 0$$

