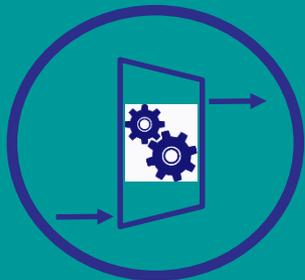


Que raconte vraiment le second principe ?



Jean-Noël JAUBERT & Romain PRIVAT

Les journées
Exergie
22 - 23 nov 2018





Equivalence de toutes les formes d'énergie ?

Le premier principe nous enseigne que l'énergie est une grandeur conservative (constante à l'échelle de l'univers) : elle ne peut être ni **détruite**, ni **créée**.

Il postule l'équivalence de toutes les formes d'énergie (du travail et de la chaleur).



Que raconte **le second principe** ?

Il codifie les transformations d'1 forme d'énergie en 1 autre.

Il conclut à une petite différence (aux lourdes conséquences) entre l'énergie calorifique et les autres formes d'énergie.

Mais quelle est donc cette différence ?

Que racontent les manuels scolaires sur le second principe ?



Impossibilité du moteur monotherme.

Il faut rendre de la chaleur à la source froide

Existence d'un rendement maximal de conversion de chaleur en travail

$$\eta_{\text{CARNOT}} = 1 - \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}$$



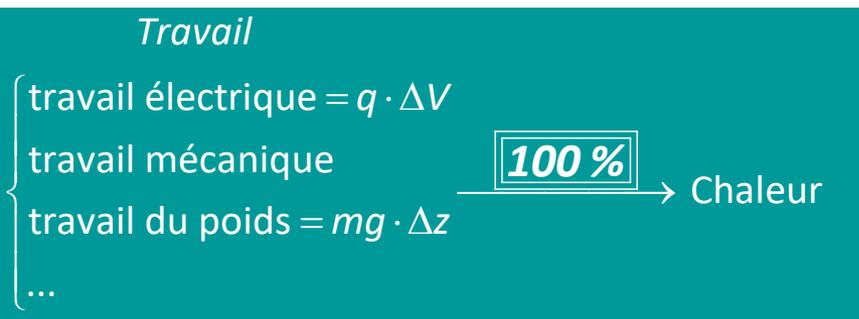
Prix d'un Joule d'énergie électrique = 3 × Prix d'un Joule de chaleur

(1 kW·h électrique = 14 c€ ; Fuel = 500 €/t (45 MJ/kg = 12,5 kW·h/kg) => 1 kW·h de chaleur = 4 c€)



La chaleur est donc une énergie de qualité inférieure.

Mais ...



Que racontent les manuels scolaires sur le second principe ?



Impossibilité du moteur monotherme.

Il faut rendre de la chaleur à la source froide

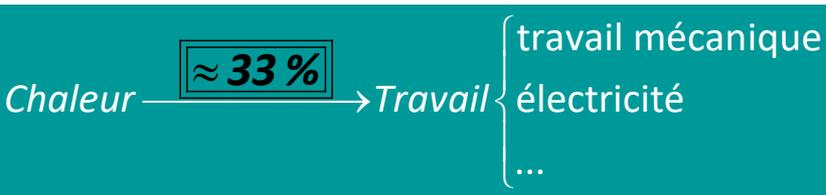
PAS propre à Q!

Existence d'un rendement maximal de conversion de chaleur en travail

Le rendement d'un moteur de Carnot est de 100 %.

La chaleur est donc une énergie de qualité inférieure.

PAS TOUJOURS !



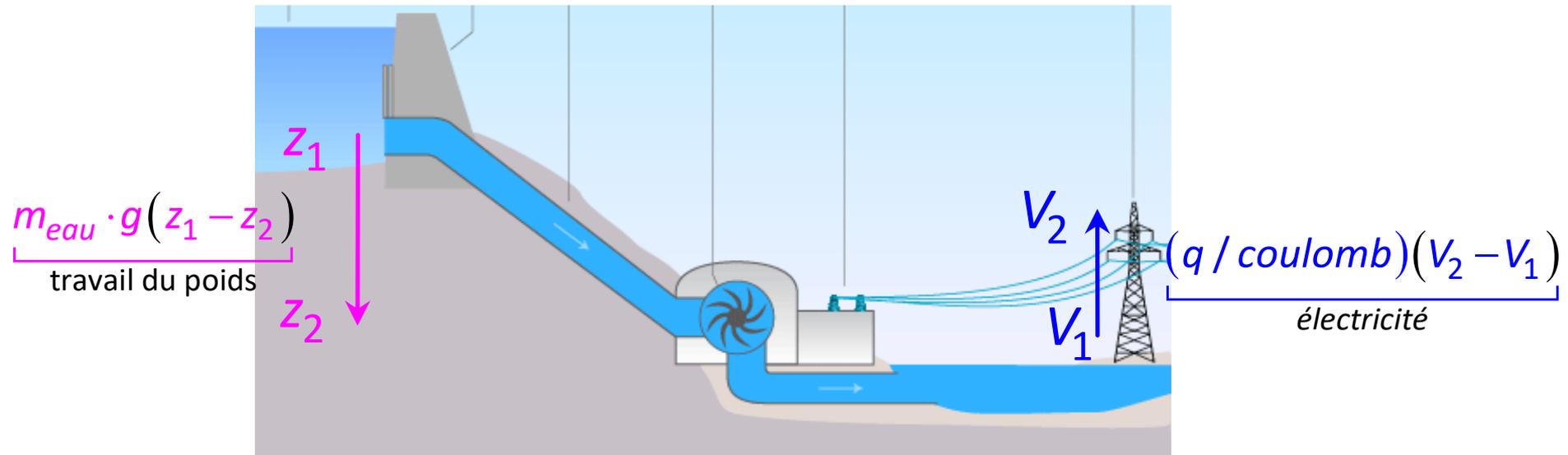
On applique 2 définitions diff. du rendement





Rendement d'un convertisseur d'énergie

❖ Exemple: rendement d'une centrale hydro-électrique :



En l'absence de frottement :

$$\underbrace{m_{eau} \cdot g(z_1 - z_2)}_{\text{travail du poids}} = \underbrace{(q / coulomb)(V_2 - V_1)}_{\text{électricité}}$$

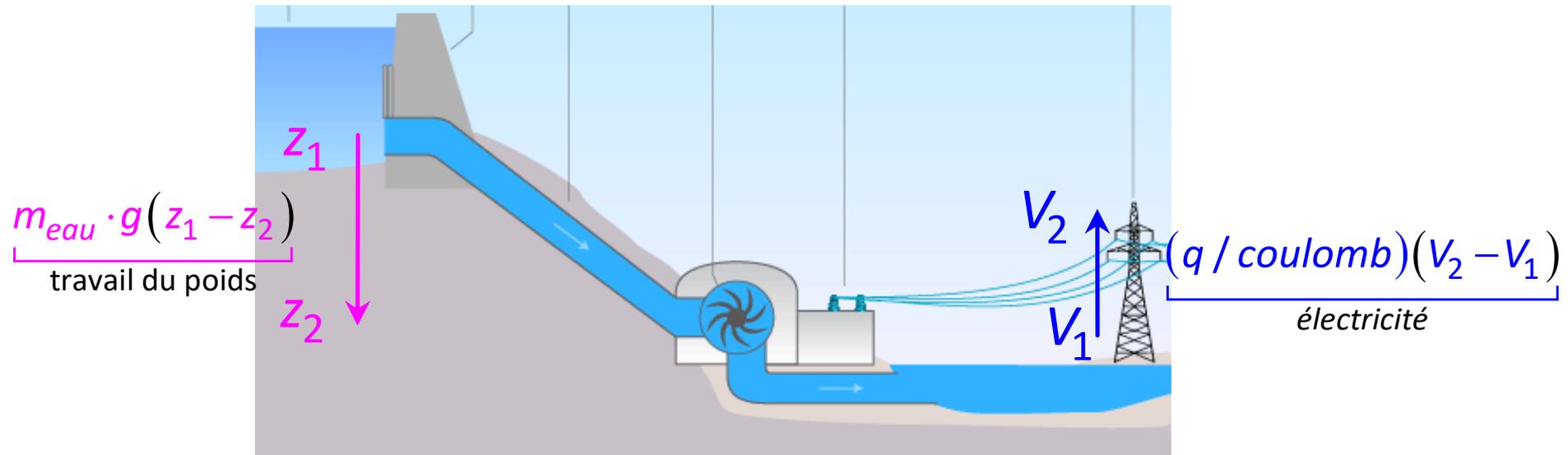


RENDEMENT =



Rendement d'un convertisseur d'énergie

❖ Exemple: rendement d'une centrale hydro-électrique :



En l'absence de frottement :

$$\underbrace{m_{eau} \cdot g(z_1 - z_2)}_{\text{travail du poids}} = \underbrace{(q / coulomb)(V_2 - V_1)}_{\text{électricité}}$$

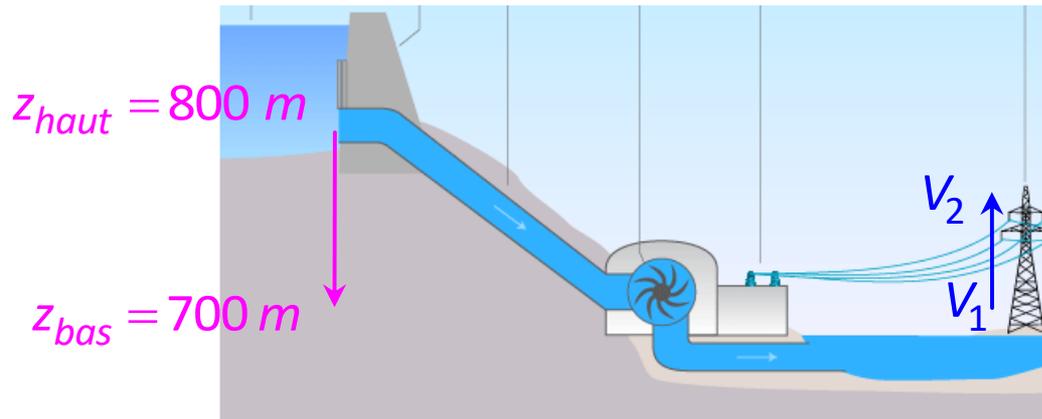

RENDEMENT = **100 %**



Rendement d'un convertisseur d'énergie

Rendement d'une centrale hydro-électrique : **autre proposition**

Prenons le cas concret du barrage de Serre-Ponçon :



$$\underbrace{m_{eau} \cdot g (z_{haut} - z_{bas})}_{\text{travail du poids}} = \underbrace{(q / \text{coulomb}) (V_2 - V_1)}_{\text{électricité}}$$

Par kg d'eau qui tombe :

- J'emprunte à la *source* à haute altitude
 $m \cdot g \cdot z_{haut} = 8000 \text{ J/kg}$
- Je rends à la *source* à basse altitude
 $m \cdot g \cdot z_{bas} = 7000 \text{ J/kg}$

Par kg d'eau qui tombe :

- Je produis 1000 J d'électricité.

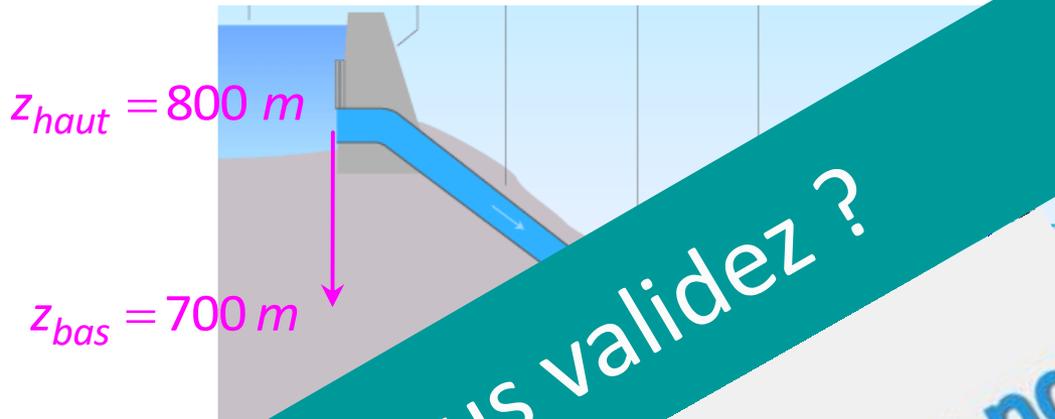
$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{électricité produite}}{\text{énergie prise à la source à haute altitude (qui rentre dans le système)}} = \left[1 - \frac{z_{bas}}{z_{haut}} \right] = \frac{1000}{8000} = \boxed{12,5\%}$$



Rendement d'un convertisseur d'énergie

Rendement d'une centrale hydro-électrique : autre proposition

Prenons le cas concret du barrage de Serre-Ponçon :



Vous validez ?

Like it or not
© MMXII BCOMbox Testing Inc. All Rights Reserved.

Par kg d'eau qui tombe :

- J'emprunte à la source à haute altitude
 $m.g.z_{haut} = 8000 \text{ J/kg}$
- Je rends à la source à basse altitude
 $m.g.z_{bas} = 7000 \text{ J/kg}$

Par kg d'eau qui tombe :

Je produis 1000 J d'électricité.

$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{électricité produite}}{\text{énergie prise à la source à haute altitude}} = \left[1 - \frac{z_{bas}}{z_{haut}} \right] = \frac{1000}{8000} = \boxed{12,5\%}$$

(qui rentre dans le système)



1^{ère} partie :

définition de l'entropie





Le second principe

Définition de l'entropie :

- Par expérience l'énergie est **multiforme**.
- Quelle que soit sa forme, l'expression d'une quantité d'énergie (E) peut être décomposée en produit de deux facteurs :



$$E = T_e \cdot E_x$$

où

$T_e =$ Tension (variable intensive)
 de la forme d'énergie considérée
 $E_x =$ Extensité (variable extensive)
 de la forme d'énergie considérée

Forme d'énergie	Tension T_e (force motrice)	Extensité E_x	E
<i>Electrique (potentielle électrostatique)</i>	potentiel électrique (volts)	charge électrique (C)	$V \cdot q$
<i>Energie de compression</i>	pression (pascals)	- volume (m^3)	$-P \cdot V$
<i>Energie potentielle de pesanteur</i>	altitude (gz) (mètres)	masse (kg)	$gz \cdot m$
<i>Energie calorifique (Q)</i>	température (kelvins)	entropie ($J \cdot K^{-1}$)	$T \cdot S$



Définition de l'entropie

Le tableau précédent met en évidence que **comme toutes les formes d'énergie, l'énergie calorifique a :**

- une TENSION : la température T .
- et une EXTENSITE nommée par Clausius l'entropie et notée S .



L'entropie peut donc être définie comme l'extensité de l'énergie calorifique.

L'entropie (l'extensité de l'énergie calorifique) est pour l'énergie calorifique le simple analogue de la masse pour l'énergie potentielle de pesanteur ou de la charge électrique pour l'énergie électrique.

Note

Comment se font les échanges d'énergie ?

C'est toujours une différence de TENSION (la force motrice du transfert d'énergie) qui va déplacer l'EXTENSITE et induire un échange d'énergie.





Le second principe

Travail / Chaleur

Note

Lorsque l'EXTENSITE d'une forme d'énergie est soumise à une différence de TENSION, il y a mise en jeu de travail (l'énergie considérée n'est pas de l'énergie calorifique) ou de chaleur :

Travail W :

$$W = Ex \cdot \Delta Te$$

$$\begin{cases} W_{elec} = q \cdot \underbrace{(V_1 - V_2)}_{\text{tension électrique}} \\ W_{du\ poids} = m \cdot g \cdot (z_1 - z_2) \end{cases} \quad \text{[Variation d'énergie potentielle]}$$

Chaleur Q:

$$Q = Ex \cdot \Delta Te = S \cdot \Delta T$$

$$Q = \underbrace{ST_1}_{Q_1} - \underbrace{ST_2}_{Q_2} \quad \text{[Variation d'énergie calorifique } \mathcal{Q} \text{]}$$





2^e partie :



Des convertisseurs d'énergie en régime permanent
à l'impossibilité du moteur (de l'émetteur)
monotherme (plus généralement mono-tension) qui
est une simple conséquence de l'indestructibilité des
extensités de toutes les formes d'énergie.

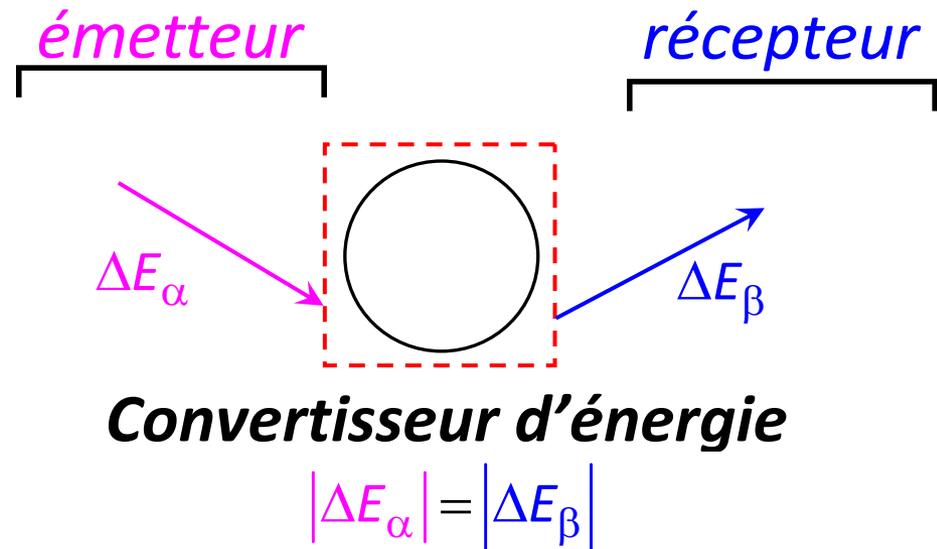




Le second principe

Convertisseur d'énergie en régime permanent : appareil qui permet de transformer indéfiniment une espèce d'énergie en une autre.

- ❖ D'après le 1^{er} principe, si de l'énergie disparaît sous une forme donnée, elle réapparaît simultanément sous une ou plusieurs autres formes.
- ❖ Ainsi, un convertisseur d'énergie, est toujours composé de 2 parties : un émetteur (d'énergie sous la forme α) et un récepteur (d'énergie sous la forme β).



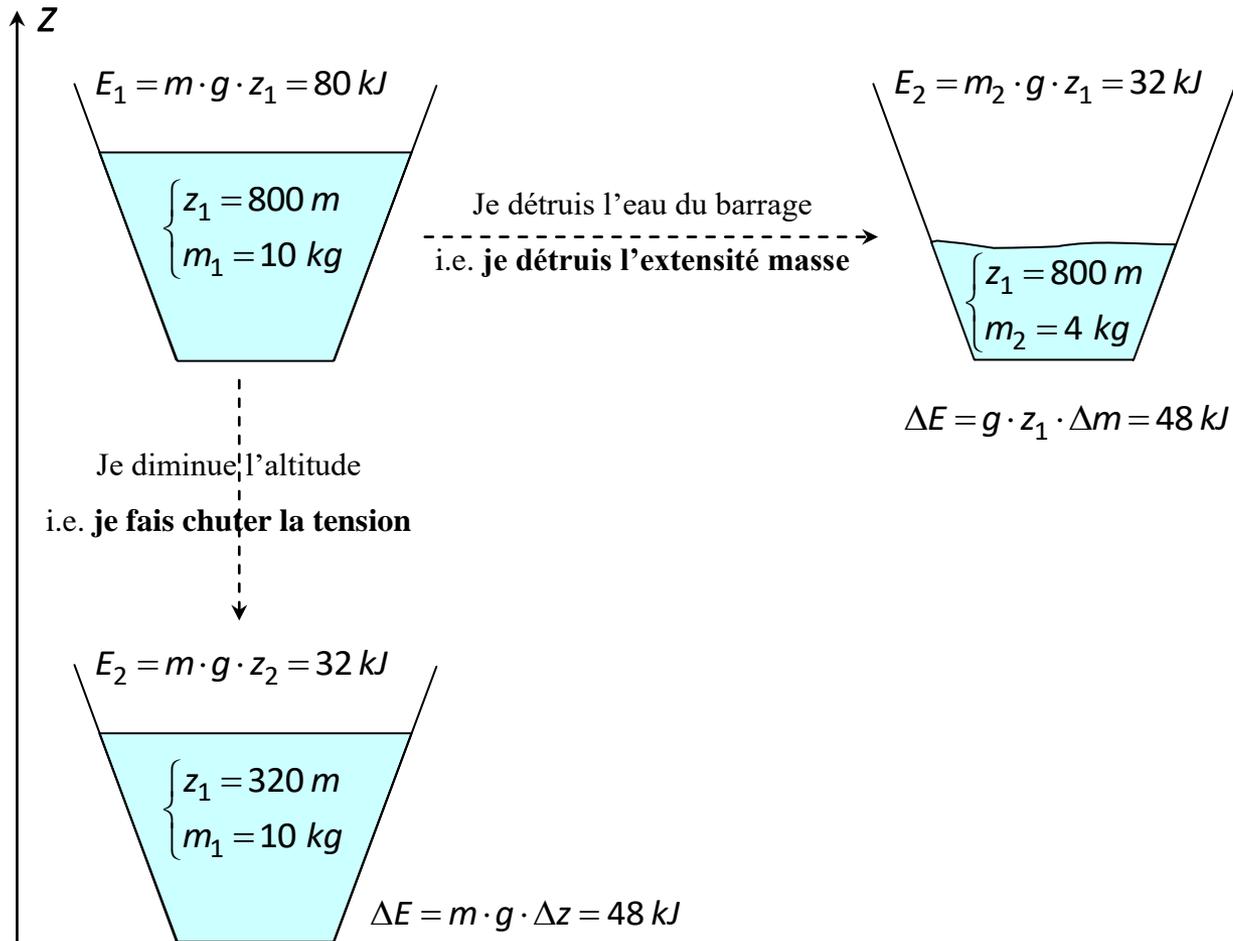
- ❖ La quantité d'énergie sous forme α diminue alors que celle sous forme β augmente.



❖ **Point de départ** : nous disposons d'énergie sous la forme α (e.g., l'eau d'un barrage en montagne). Pour faire diminuer la quantité d'énergie E_α , on peut :

- soit faire chuter sa tension
- soit **détruire** une partie de son extensité

$$E_\alpha = T e_\alpha \cdot Ex_\alpha$$

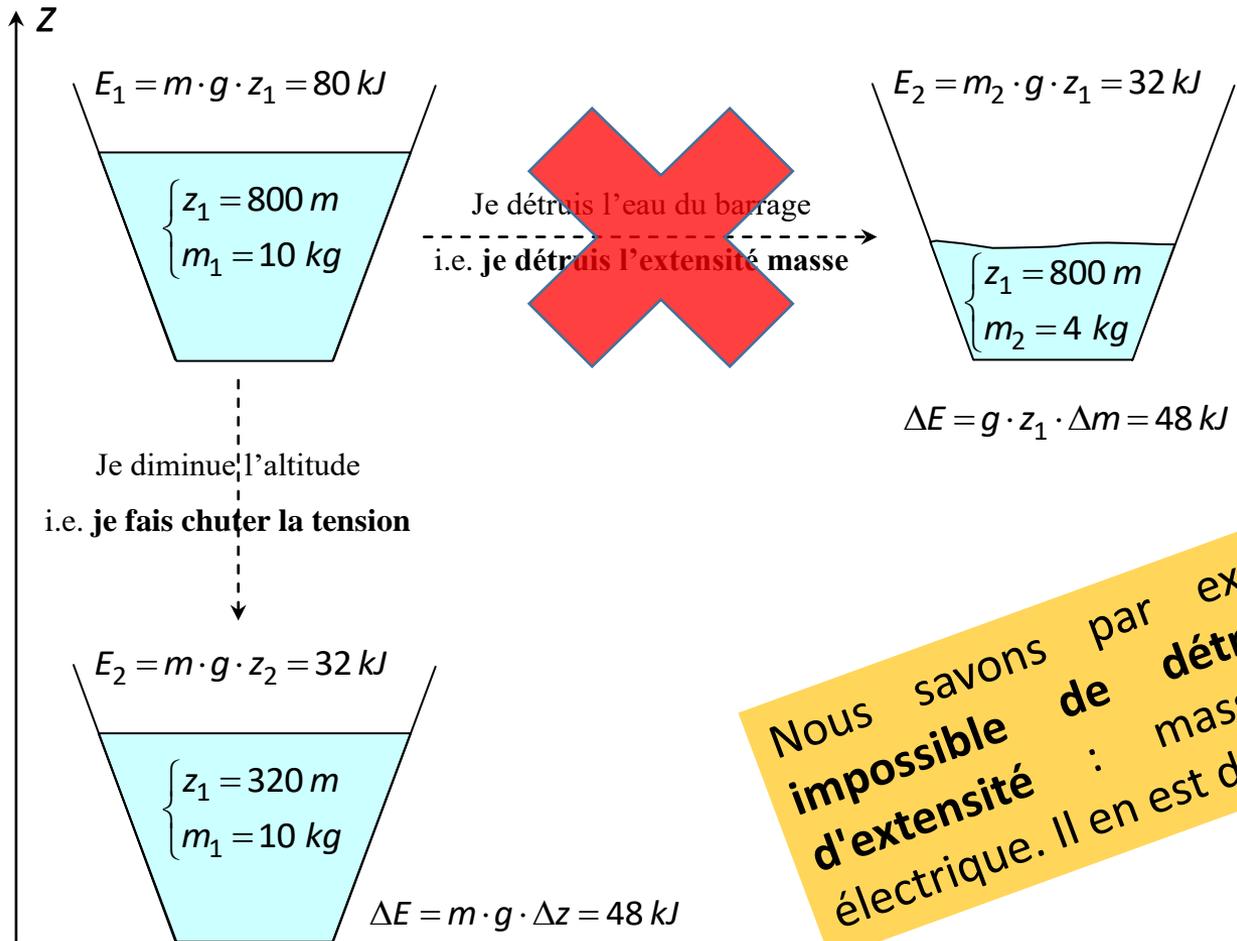


L'émetteur d'énergie sous une forme donnée *y compris l'énergie calorifique*

❖ **Point de départ :** nous disposons d'énergie sous la forme α (e.g., l'eau d'un barrage en montagne). Pour faire diminuer la quantité d'énergie E_α , on peut :

- soit faire chuter sa tension
- soit **détruire** une partie de son extensité

$$E_\alpha = T e_\alpha \cdot Ex_\alpha$$



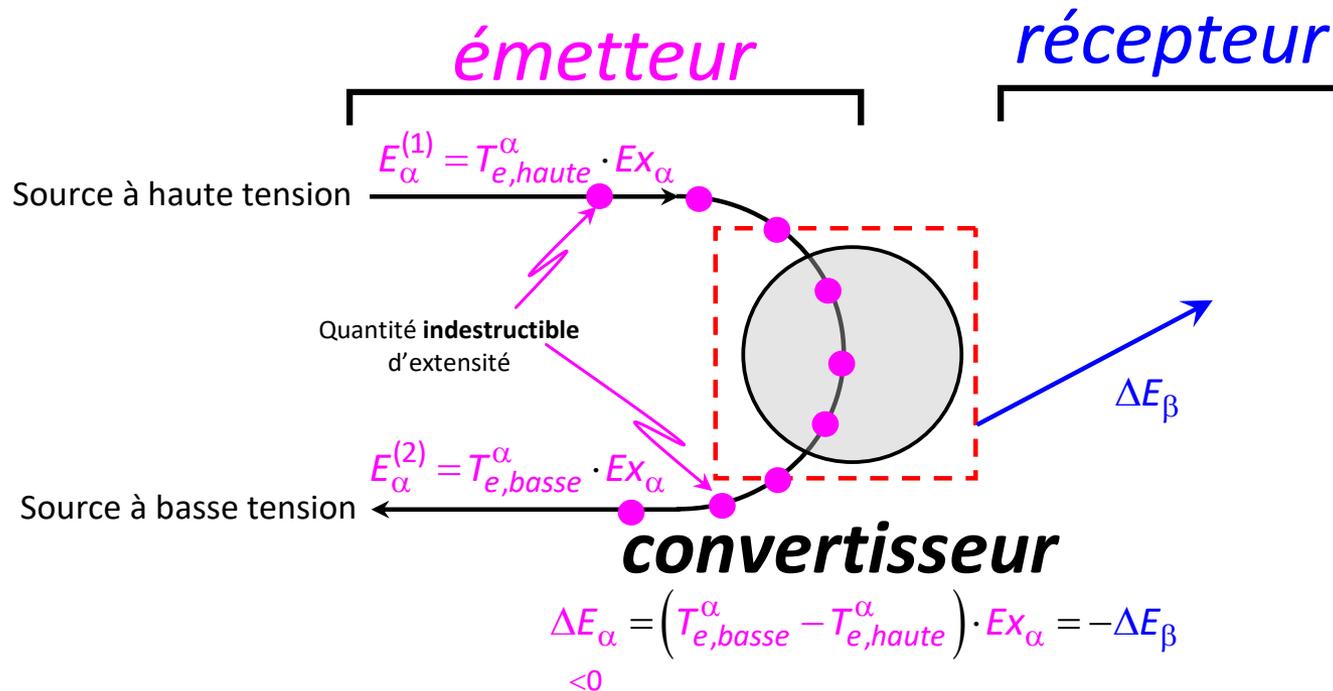
Nous savons par expérience qu'il est impossible de détruire les variables d'extensité : masse, volume, charge électrique. Il en est de même de l'entropie.



 L'émetteur d'énergie sous une forme donnée y compris l'énergie calorifique

Bilan :

L'émetteur en amont d'un convertisseur d'énergie doit donc toujours comporter 2 parties à des tensions différentes : une première partie à haute tension **qui donne** et une partie à basse tension **qui reçoit** la quantité d'extensité qui transite d'une source à l'autre. **D'où l'impossibilité du moteur monotherme (plus généralement mono-tension).**



Quelle que soit la forme d'énergie, on emprunte une quantité d'énergie à la source à haute tension et on en rend une partie à la source basse tension. Si l'énergie est de l'énergie calorifique : on en prend à la source chaude et on en rend à la source froide.



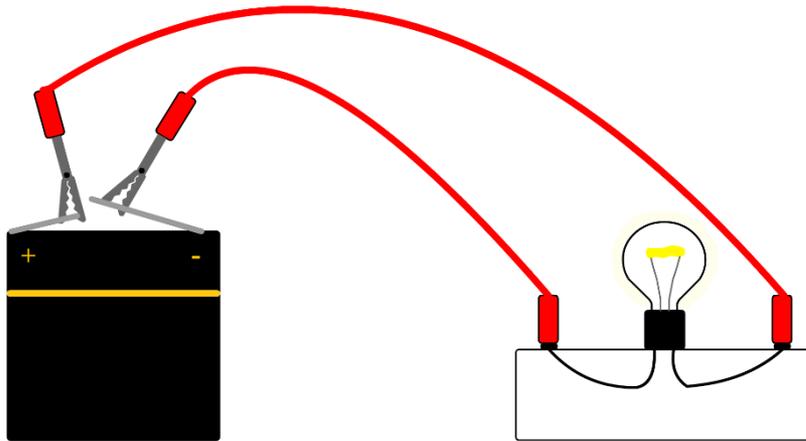
L'impossibilité du moteur monotherme est la simple conséquence de l'indestructibilité de l'entropie.

PAS propre à Q !
Aucun moteur ne peut fonctionner avec 1 seule source d'énergie.
Cette impossibilité **générale** résulte de principes qui affirment l'indestructibilité des extensités.

- ❖ Ex : dans une centrale hydro-électrique, l'énergie provient de la chute d'une **masse** d'eau (l'extensité) depuis une altitude haute vers une altitude basse.
Pour réaliser un moteur mono-altitude, il faudrait détruire l'eau du barrage.

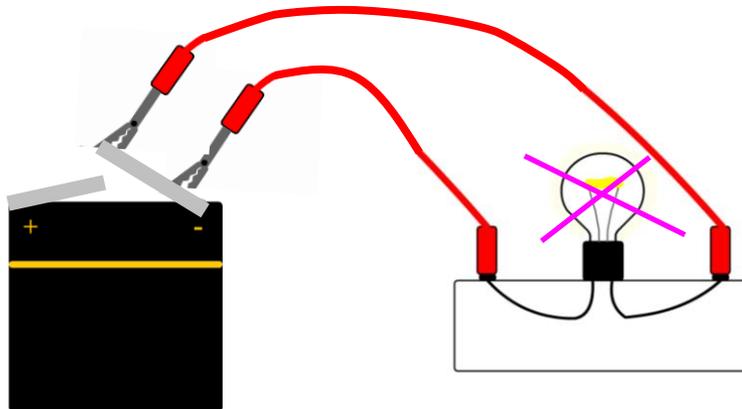


- ❖ Ex : dans une pile, l'énergie provient du passage de charges électriques (l'extensité) d'un potentiel électrique élevée (V^+) à un potentiel électrique plus faible (V^-).
Pour réaliser une pile mono-potentiel, il faudrait détruire des charges électriques.



Ça marche !

$$W_{elec} = q \underbrace{(V^+ - V^-)}_{4,5 \text{ volts}}$$



La pile mono-potentiel électrique va marcher beaucoup moins bien !
(sauf si on parvenait à détruire des charges électriques)



3^e partie :

- Le récepteur NON-calorifique
- Rendement des moteurs réversibles et notamment celui de Carnot.



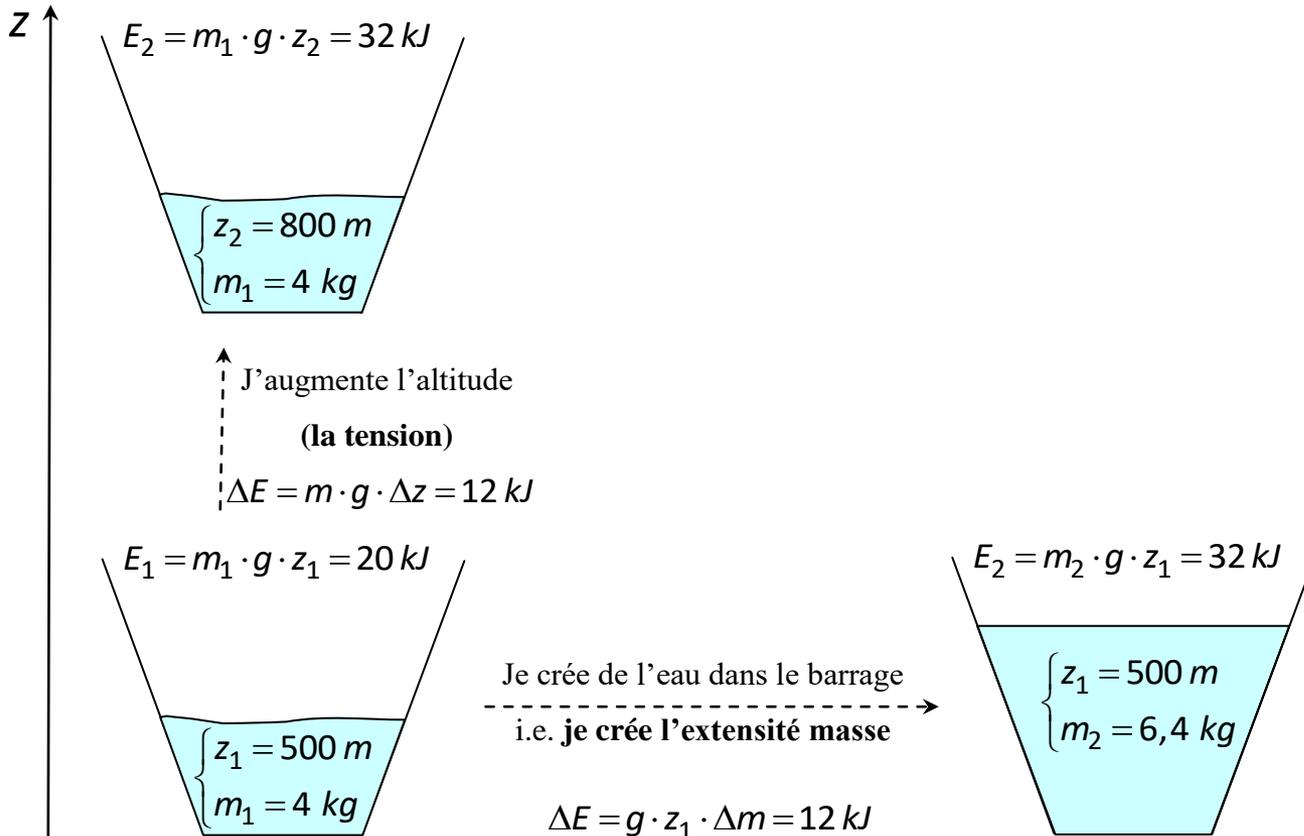
Le récepteur d'énergie MON calorifique

- ❖ **Point de départ** : d'après le premier principe, la diminution de la quantité d'énergie sous la forme α (coté émetteur) doit être compensée par **l'augmentation** d'une quantité d'énergie sous une autre forme (forme β , coté récepteur).

$$E_{\beta} = T e_{\beta} \cdot Ex_{\beta}$$

on peut :

- soit augmenter sa tension
- soit **créer** de son extensité





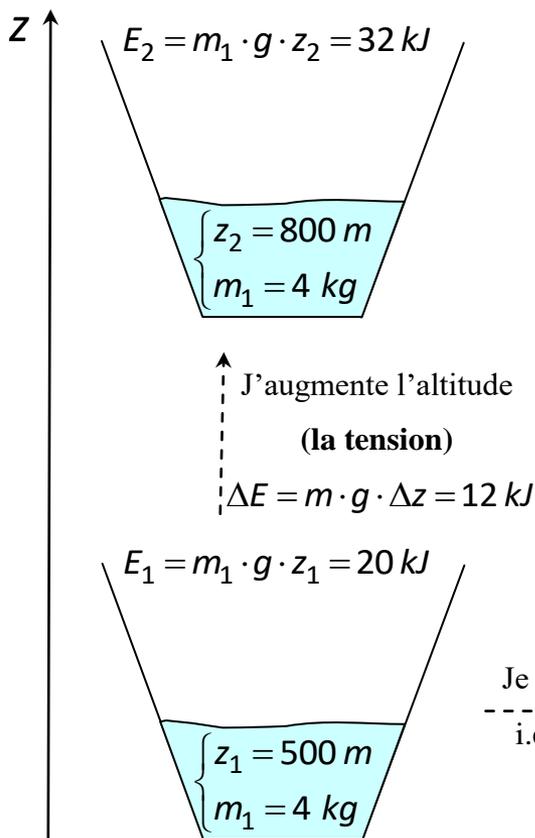
Le récepteur d'énergie NON calorifique

- ❖ **Point de départ** : d'après le premier principe, la diminution de la quantité d'énergie sous la forme α (coté émetteur) doit être compensée par **l'augmentation** d'une quantité d'énergie sous une autre forme (forme β , coté récepteur).

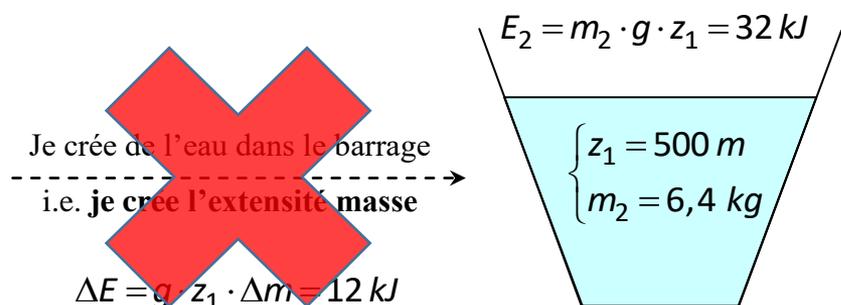
$$E_\beta = T e_\beta \cdot Ex_\beta$$

on peut :

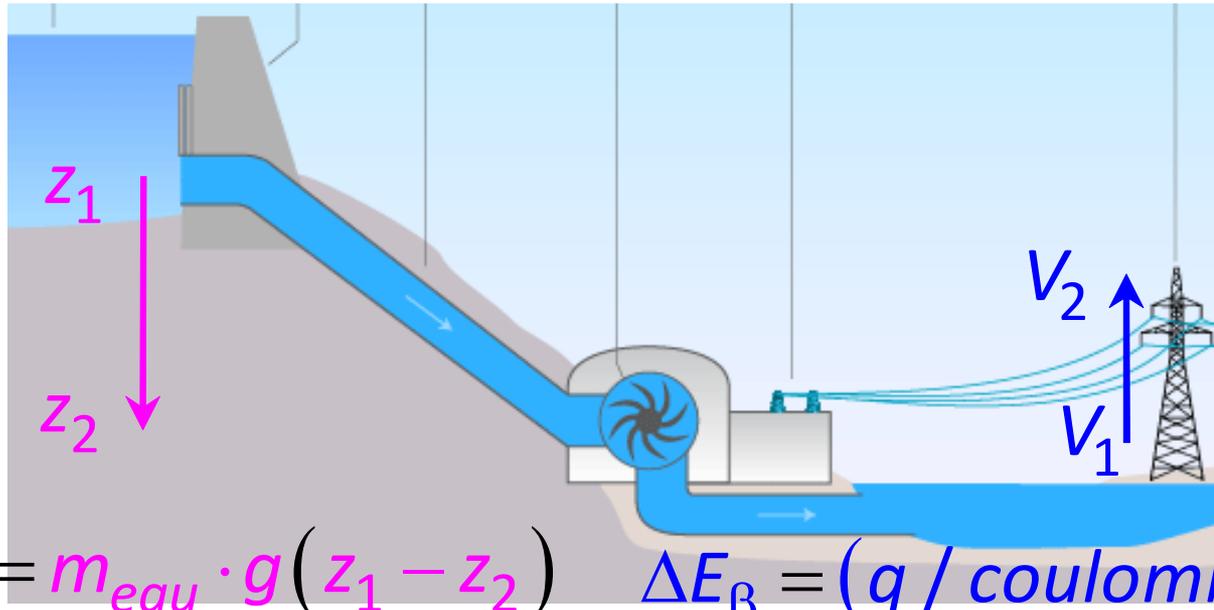
- soit augmenter sa tension
- soit **créer** de son extensité



Nous savons par expérience qu'il est impossible de créer des masses, des volumes, des charges électriques ... c'est-à-dire de créer **les extensités des formes d'énergie NON calorifiques.**



❖ Exemple 1 : centrale hydro-électrique



$$-\Delta E_\alpha = \underbrace{m_{eau} \cdot g}_{Ex_\alpha} (z_1 - z_2) \quad \Delta E_\beta = \underbrace{(q / coulomb)}_{Ex_\beta} (V_2 - V_1)$$

Au fur et à mesure que l'extensité $m_{eau} \cdot g$ tombe de z_1 à z_2 , l'extensité q est remontée de V_1 à V_2 .

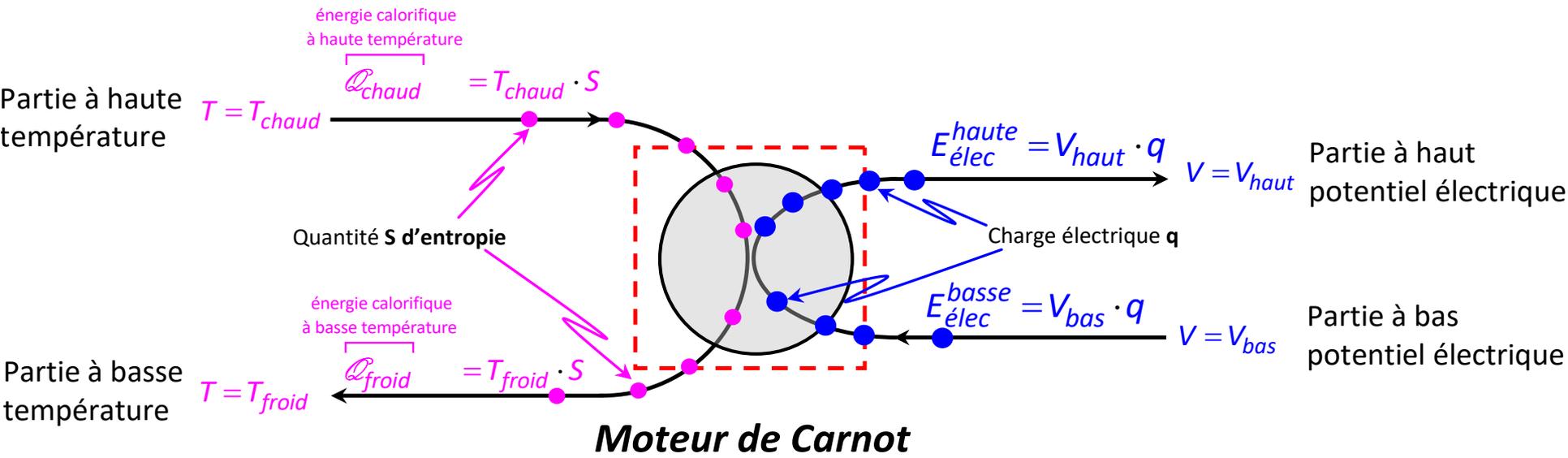
100 % de la variation d'énergie potentielle de pesanteur est transformée en électricité. Le rendement d'un tel moteur ($\Delta E_\beta / \Delta E_\alpha$) est donc de **100 %**.





Rendement de tels moteurs (E_β n'est PAS de l'énergie calorifique)

❖ Exemple 2 : moteur thermique de Carnot (transformation continue de chaleur en électricité)



Moteur de Carnot

$$\underbrace{Q_{\text{émis}}}_{\text{chaleur émise}} = (T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}) \cdot S = W_{\text{élec}} = (V_{\text{haut}} - V_{\text{bas}}) \cdot q$$

Au fur et à mesure que l'entropie S tombe de T_{chaud} à T_{froid} , l'extensité q est remontée de V_{bas} à V_{haut} .

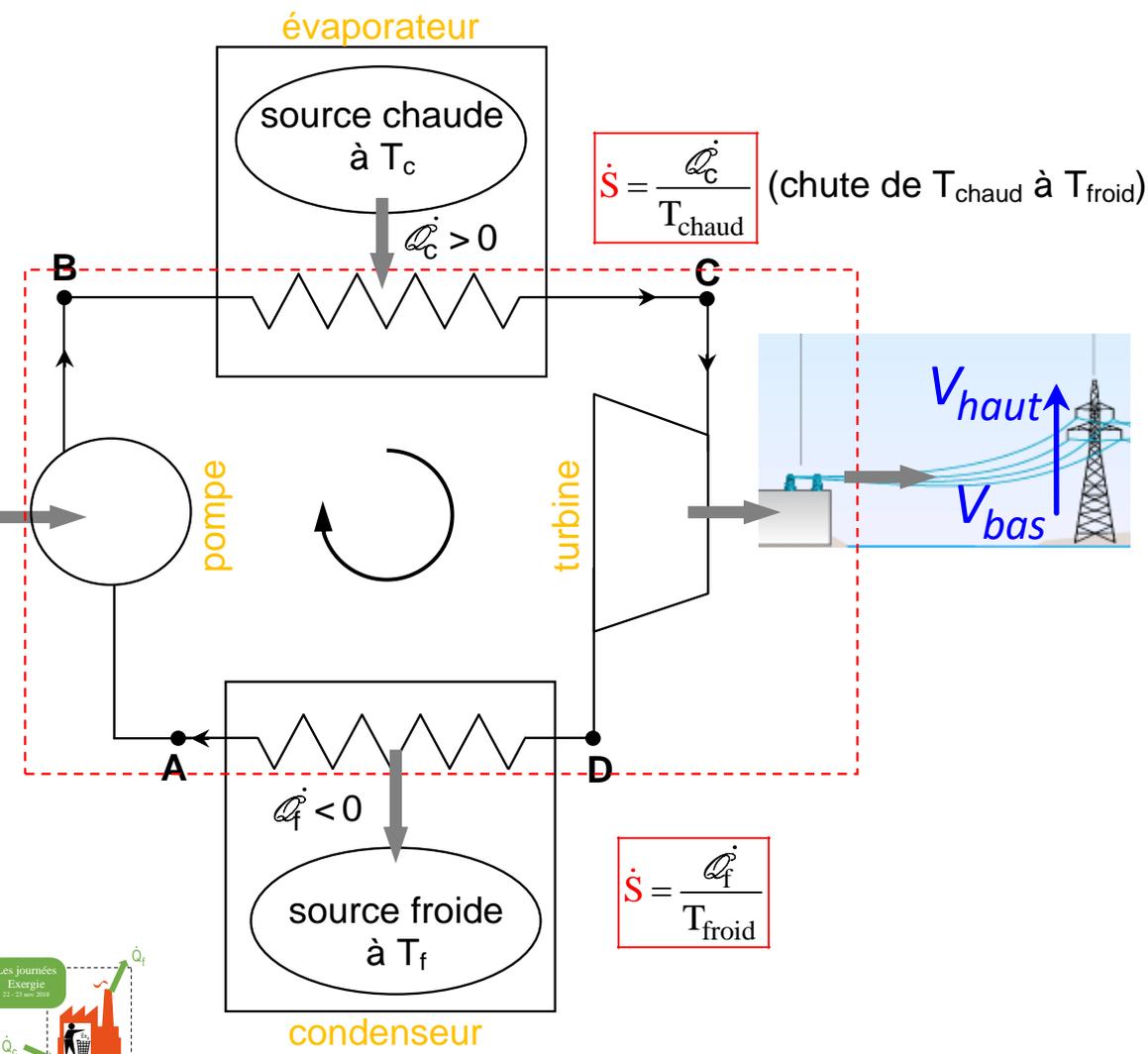
100 % de la chaleur émise du fait de la chute de température de l'entropie S , i.e. $Q_{\text{émis}} = S(T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}})$ est transformée en électricité.

Le rendement d'un tel moteur (électricité produite/chaleur émise) est donc de **100 %**.



Rendement de tels moteurs (E_β n'est PAS de l'énergie calorifique)

❖ Exemple 2 : moteur thermique de Carnot (transformation continue de chaleur en électricité)



Au fur et à mesure que l'entropie S tombe de T_{chaud} à T_{froid} , l'extensité q est remontée de V_{bas} à V_{haut} .

100 % de la chaleur émise du fait de la chute de température de l'entropie S , i.e.

$Q_{émis} = S(T_{chaud} - T_{froid})$ est transformée en électricité.

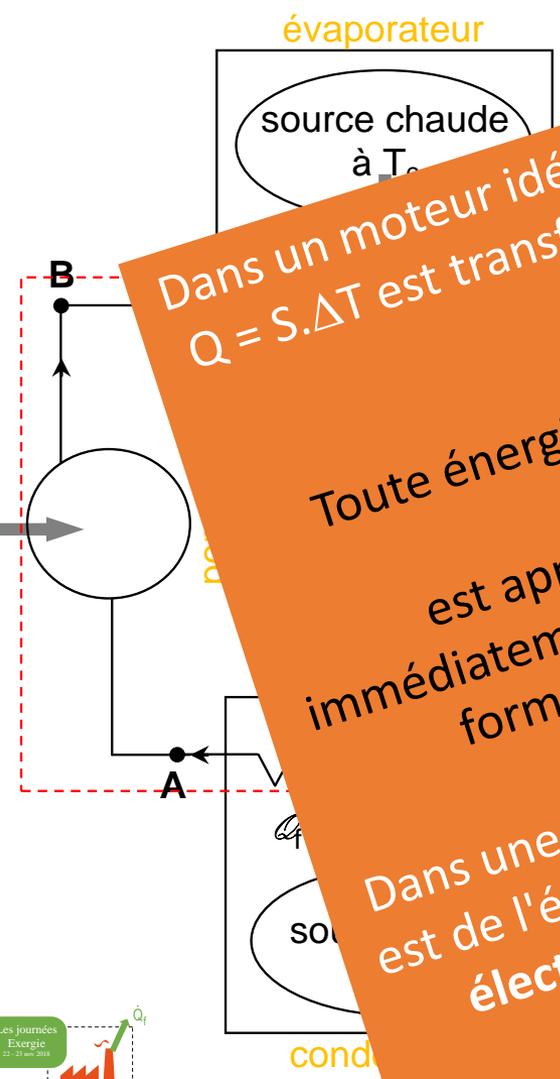
Le rendement d'un tel moteur (électricité produite/chaleur émise) est donc de **100 %**.





Rendement de tels moteurs (E_β n'est PAS de l'énergie calorifique)

❖ Exemple 2 : moteur thermique de Carnot (transformation de la chaleur en électricité)



Dans un moteur idéal de CARNOT (sans frottement), la chaleur $Q = S \cdot \Delta T$ est transformée en électricité avec un rendement de 100 % !!!

Toute énergie à 2 sources (à 2 tensions), i.e. qui s'écrit : $E = \text{Extensité} \cdot \Delta \text{tension}$ est appelée de l'**énergie noble**. C'est de l'énergie immédiatement utilisable par l'homme (on peut passer d'une forme à 1 autre avec un rendement de $\approx 100\%$).

Dans une machine de CARNOT (moteur, frigo, PAC), la chaleur est de l'énergie noble et a donc la **même qualité que l'énergie électrique** (les bilans énergétiques et exergétiques sont rigoureusement identiques).

rendement d'un tel moteur (électricité produite/chaleur émise) est donc de **100 %**.



Extrait de : "Réflexions sur la puissance motrice du feu" – Nicolas Léonard Sadi CARNOT (1796-1832)

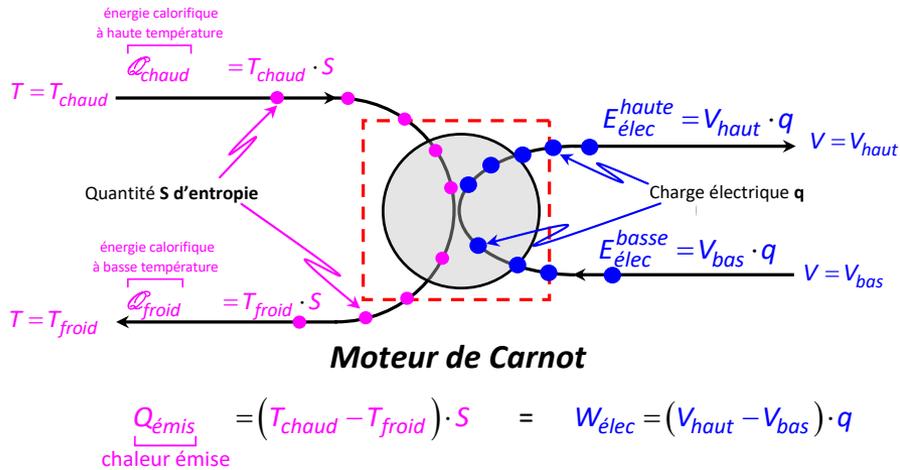


La puissance motrice d'une chute d'eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employé, et de ce qu'on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet la hauteur de sa chute (r), c'est-à-dire de la différence de température des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique. Dans la chute d'eau, la puissance motrice est rigoureusement proportionnelle à la différence de niveau entre le réservoir supérieur et le réservoir inférieur. Dans la chute du calorique, la puissance motrice augmente sans doute avec la différence de température entre le corps chaud et le corps froid;





Rendement de tels moteurs (E_β n'est PAS de l'énergie calorifique)

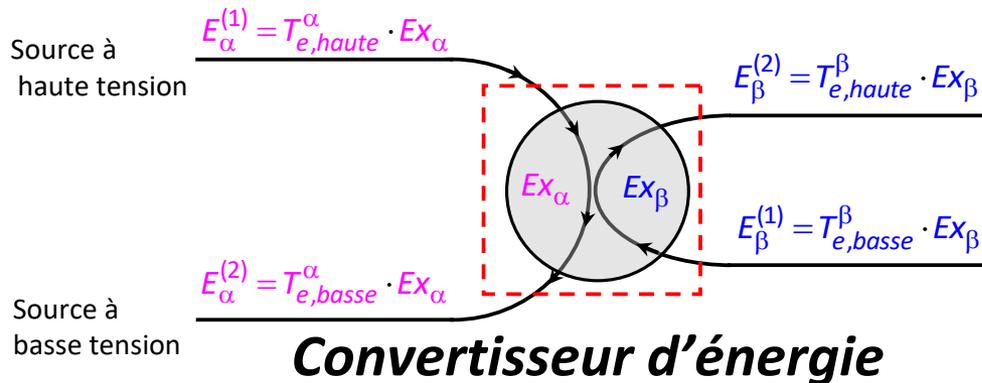


Définir le rendement d'un moteur thermique (de Carnot) comme :

$$\begin{aligned}
 \eta_{CARNOT} &= \frac{W_{elec}}{Q_{chaud}} \\
 &= \frac{(T_{chaud} - T_{froid}) \cdot S}{T_{chaud} \cdot S} \\
 &= 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}} \approx 33\%
 \end{aligned}$$

a certainement un intérêt économique (pour générer Q_{chaud} , on brûle du charbon que l'on a acheté) mais laisse sous entendre que l'on ne peut pas transformer la chaleur en travail avec un rendement de 100 % dans une machine réversible (sans frottement) ce qui est à l'origine **d'une très grande confusion**.

Quoi qu'il en soit, si l'on choisit de définir le rendement d'un moteur thermique par $1 - T_{froid}/T_{chaud}$, il faut faire de même avec tous les convertisseurs d'énergie (ce qui n'est jamais fait). Et dans ce cas :



$$\Delta E_\alpha = (T_{e,basse}^\alpha - T_{e,haute}^\alpha) \cdot EX_\alpha < 0 = -\Delta E_\beta = (T_{e,basse}^\beta - T_{e,haute}^\beta) \cdot EX_\beta > 0$$

Source à haute tension
Source à basse tension

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{|\Delta E_\beta|}{E_\alpha^{(1)}} \\
 &= \frac{(T_{e,haute}^\alpha - T_{e,basse}^\alpha) \cdot EX_\alpha}{T_{e,haute}^\alpha \cdot EX_\alpha} \\
 &= 1 - \frac{T_{e,basse}^\alpha}{T_{e,haute}^\alpha}
 \end{aligned}$$

Serre-Ponçon :

$h_{haut} = 800 \text{ m}$
 et
 $h_{bas} = 700 \text{ m}$.

$\eta = 12,5 \% !!!$

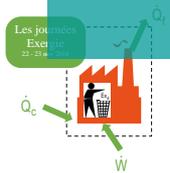


4^e partie : le second principe



Il autorise :

1. La création d'entropie
2. Le récepteur monotherme
3. La dégradation d'énergie noble
4. Le transfert quantitatif d'énergie calorifique





Le second principe

Où en sommes-nous ?

- Quelle que soit la forme d'énergie considérée (**énergie calorifique comprise**) :

L'émetteur mono-tension est interdit.



En effet, aucune variable d'extensité : masse, volume, charge électrique, entropie ... ne peut être détruite.

- Quelle que soit la forme d'énergie considérée (**énergie calorifique EXCLUE**) :

Le récepteur mono-tension est interdit.



En effet, aucune variable d'extensité : masse, volume, charge électrique ... ne peut être créée.

**Qu'en est-il de l'entropie (extensité de l'énergie calorifique) ?
C'est tout l'objet du second principe.**





Le second principe

Que raconte le 2° principe :



Le second principe autorise la création d'entropie.

ou de manière équivalente

Le second principe autorise le récepteur monotherme

La force du second principe ne provient donc pas de ce qu'il interdit mais de ce qu'il autorise !



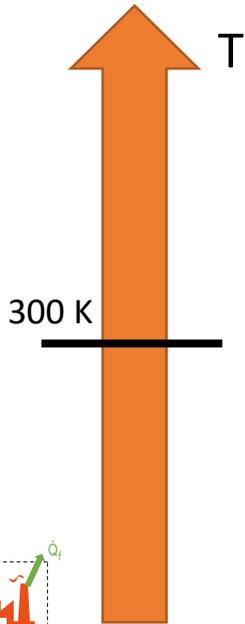
Le récepteur monotherme

- ❖ **Point de départ** : d'après le premier principe, la diminution de la quantité d'énergie sous la forme α (coté émetteur) doit être compensée par **l'augmentation** d'une quantité d'énergie sous une autre forme (forme β , coté récepteur).

$$E_\beta = T e_\beta \cdot Ex_\beta$$

- on peut :
- soit augmenter sa tension
 - soit **créer** de son extensité

Si la forme β est de l'énergie calorifique, d'après le second principe, cette augmentation peut provenir d'une **création d'entropie** à température constante T_0 .



T = 300 K



$$Q_1 = S_1 \cdot T = 10 \text{ J/K} \times 300 \text{ K} = 3 \text{ kJ}$$

T = 300 K



$$Q_2 = S_2 \cdot T = 20 \text{ J/K} \times 300 \text{ K} = 6 \text{ kJ}$$

T = 300 K



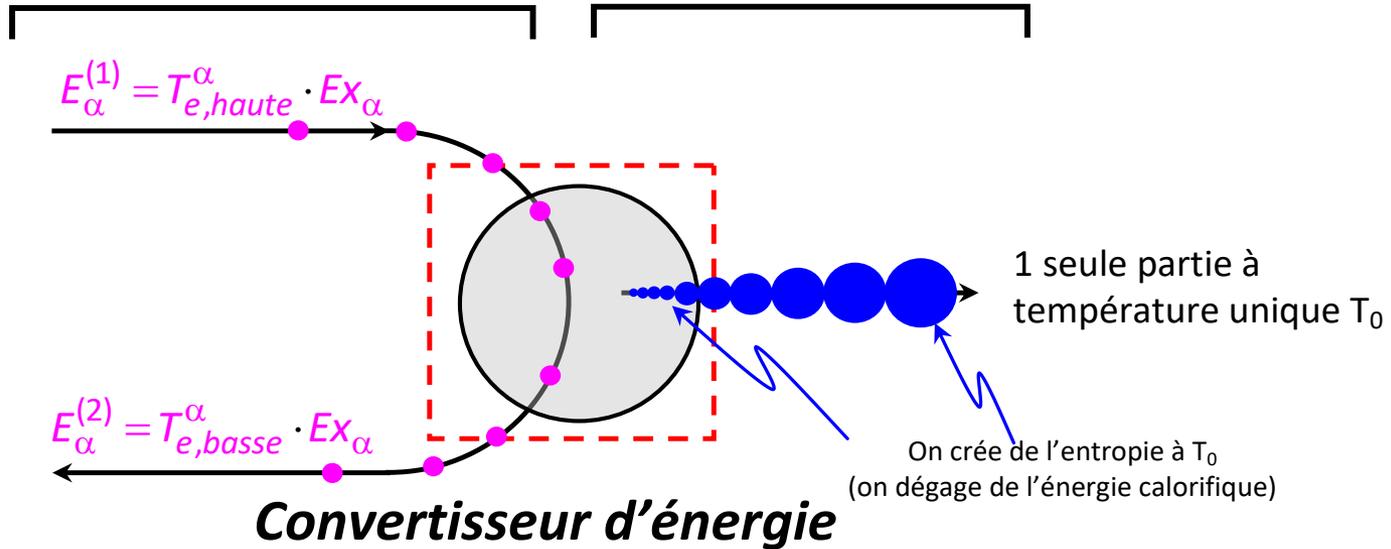
$$Q_3 = S_3 \cdot T = 50 \text{ J/K} \times 300 \text{ K} = 15 \text{ kJ}$$





Le récepteur monotherme

émetteur bi-tension récepteur monotherme



$$-\Delta E_{\alpha} = \left(T_{e,haute}^{\alpha} - T_{e,basse}^{\alpha} \right) \cdot EX_{\alpha} > 0 = \underbrace{E_{calorifique}}_{Q > 0} = T_0 \cdot S_{créée}$$

La création d'entropie correspond toujours à de la dégradation d'énergie noble (à 2 sources/à 2 tensions) en énergie calorifique MONOTHERME (non noble).

On ne pourra plus revenir en arrière, i.e. reconvertir à 100 % cette énergie calorifique mono-température en énergie noble à cause de l'impossibilité de l'émetteur monotherme - cette énergie calorifique monotherme est donc de qualité inférieure.

En pratique, cette dégradation est souvent la conséquence d'une force de frottement





Le second principe



Le récepteur monotherme - Bilan

Le 2^e principe nous enseigne que :

- Grâce au récepteur monotherme, il est possible (et facile par frottement) de transformer **avec un rendement de 100 %** n'importe quelle forme d'énergie noble (à 2 tensions) en énergie calorifique (monotherme) :



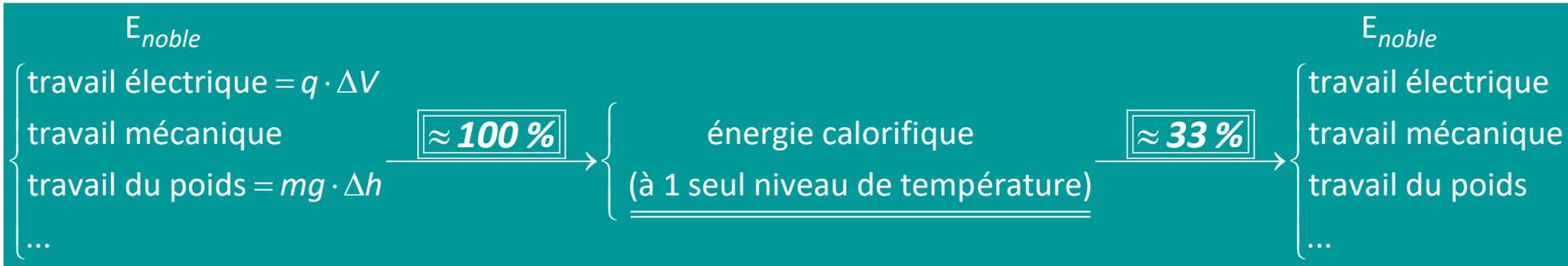


Le second principe



Le récepteur monotherme - Bilan

- ❑ **La transformation inverse est impossible** : la transformation d'énergie calorifique à 1 seul niveau de température (ou plus généralement d'énergie disponible à 1 seule tension) en énergie noble se fait toujours avec un rendement TRES inférieur à 100 %.



(impossibilité de l'émetteur monotherme – plus généralement mono-tension)

$$\eta_{CARNOT} = 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}}$$

La création d'entropie = la dégradation d'énergie noble en énergie calorifique MONOTHERME est ainsi toujours irréversible (c'est en cela que le 2° principe est un principe d'évolution).





Il y a 1 cause unique de création d'entropie : la dégradation d'énergie noble en énergie calorifique monotherme.

❑ **Exemple 1 : effet Joule**

Dégradation de travail électrique en énergie calorifique monotherme dans une résistance électrique par effet Joule (on dispose de travail électrique $W_{\text{élec}} = q \cdot \Delta V$ et on ne s'en sert pas pour le convertir en une autre forme d'énergie noble) :

$$W_{\text{élec}} = (V_{\text{haute}} - V_{\text{basse}}) \cdot q = \underbrace{Q}_{\text{énergie calorifique}} = T_0 \cdot S_{\text{créée}}$$

❑ **Exemple 2 : réaction chimique**

Si on laisse la réaction chimique se faire spontanément sans chercher à transformer l'énergie chimique (de l'énergie noble) en une autre forme d'énergie (comme dans une pile), alors toute l'énergie chimique est dégradée en énergie calorifique à température unique :

$$\mathcal{A} \cdot d\xi = T \cdot \delta S_{\text{créée}}$$

énergie chimique

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{A} = \text{l'affinité} = -\Delta_r G = \sum_{\text{réactifs } i} \nu_i \mu_i - \sum_{\text{produits } j} \nu_j \mu_j = \Delta \text{Tension} \\ \xi = \text{l'avancement (l'extensité)} \end{array} \right.$$



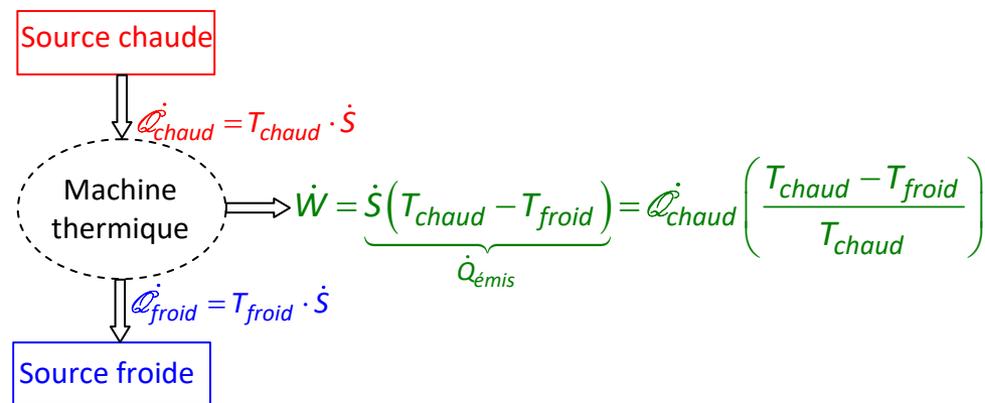


Le second principe

Causes de création d'entropie / d'irréversibilité / de dégradation d'énergie noble en énergie calorifique monotherme / de mise en œuvre du récepteur monotherme

□ Retour sur le rendement d'un moteur thermique de Carnot :

Montrons que : $1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}}$ est en réalité le rendement d'un moteur chimique !



Dans un moteur thermique de Carnot le rendement de conversion de chaleur en travail est de **100 %**.

C'est indiscutable : du point de vue thermodynamique, le rendement d'un moteur réversible ne peut être qu'égal à 1.



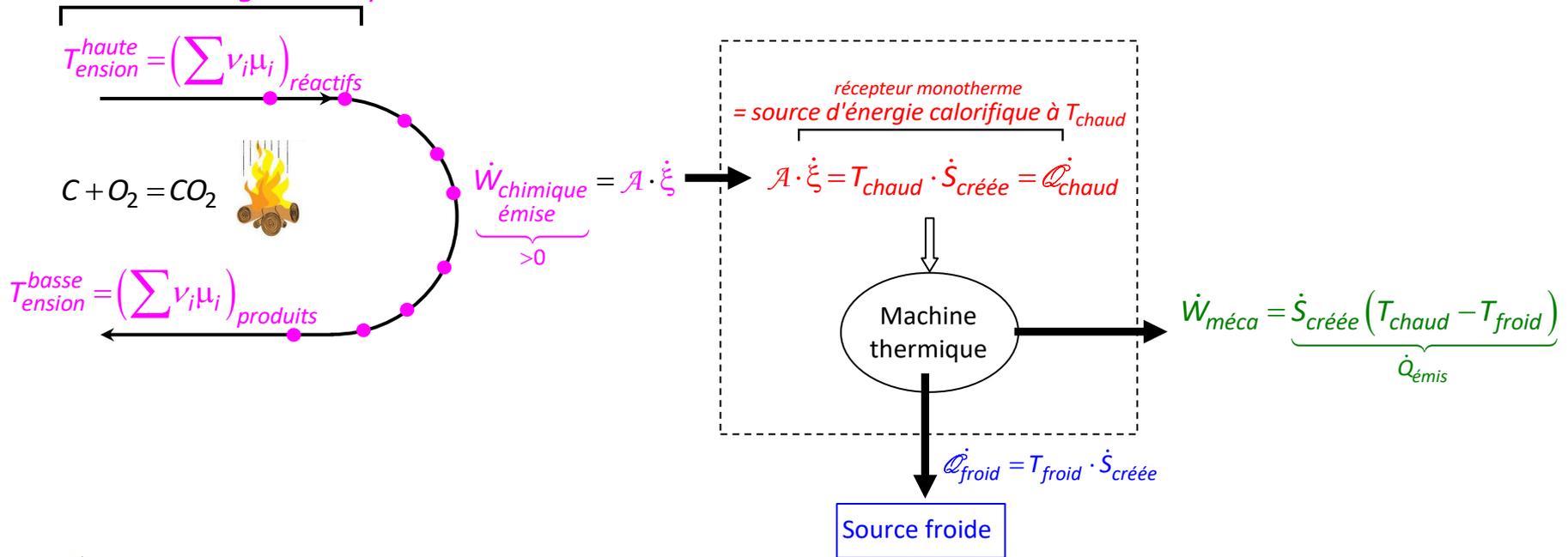


Le second principe

Causes de création d'entropie / d'irréversibilité / de dégradation d'énergie noble en énergie calorifique monotherme / de mise en œuvre du récepteur monotherme

- Englobons désormais la chaudière. Le moteur de Carnot est en effet alimenté en énergie calorifique par la combustion du charbon/fuel. La source d'énergie de la machine de Carnot est donc de l'énergie chimique (W_{chim}) qui est entièrement dégradée en énergie calorifique monotherme (cédée à l'unique température T_{chaud} de la chaudière).

émetteur d'énergie chimique



$$\frac{\dot{W}_{\text{méca}}}{\dot{W}_{\text{chimique émise}}} = \frac{\dot{S}_{\text{créée}} (T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}})}{\dot{S}_{\text{créée}} \cdot T_{\text{chaud}}} = 1 - \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}$$

Rendement faible à cause des irréversibilités





Le second principe

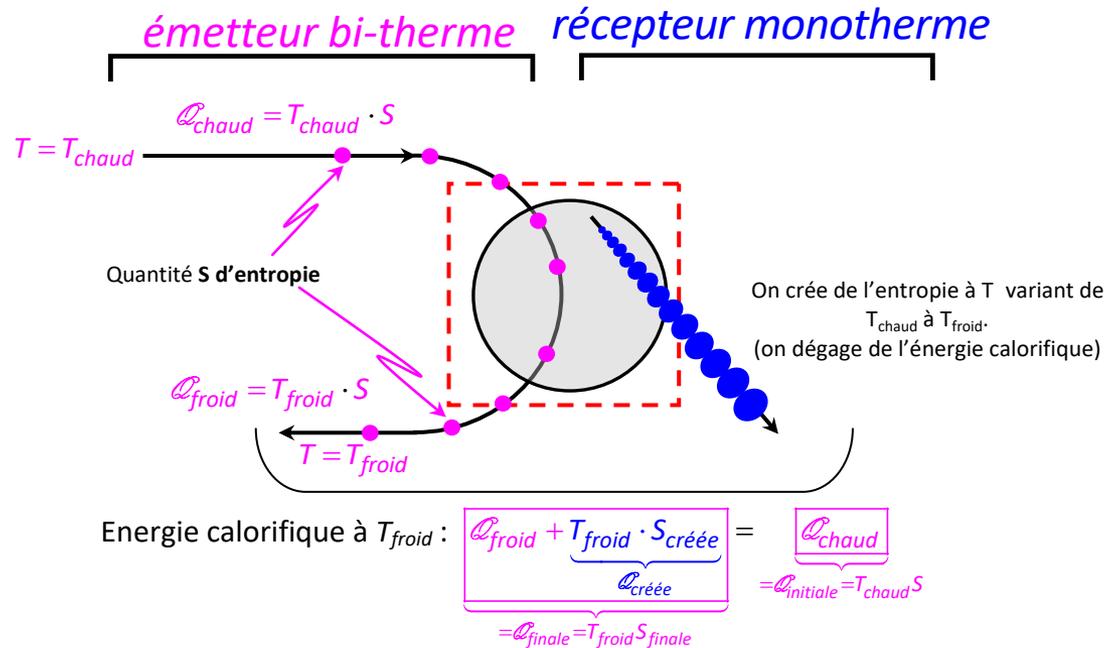
❑ **Exemple 3** : le transfert d'énergie calorifique (*de chaleur*) spontané = **dégradation de chaleur (noble) en énergie calorifique monotherme.**

Au fur et à mesure que l'extensité entropie S tombe de T_{chaud} à T_{froid} , l'énergie calorifique $T.S$ diminue coté émetteur. Il faut donc (1^{er} principe oblige) générer à chaque température une quantité équivalente d'énergie calorifique par création d'entropie.

La quantité d'énergie calorifique restant la même, elle est progressivement transférée de T_{chaud} à T_{froid} .

Equation générale :

$$\Delta Q = Q_{créée} \\ Q_{émis} = (T_{chaud} - T_{froid}) \cdot S \quad T_{froid} \cdot S_{créée} > 0$$



L'énergie calorifique initialement à T_{chaud} se transforme en totalité en énergie calorifique à température inférieure (T_{froid}). Le calcul de l'entropie créée est immédiat :

$$\underbrace{T_{chaud} S}_{Q_{initiale}} = \underbrace{T_{froid} S_{finale}}_{Q_{finale}} \Leftrightarrow S_{créée} = S_{finale} - S = Q \left(\frac{1}{T_{froid}} - \frac{1}{T_{chaud}} \right)$$

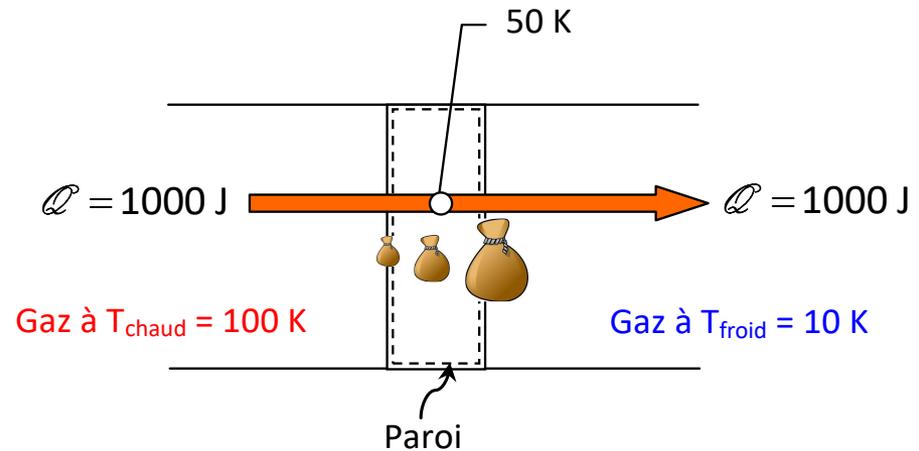
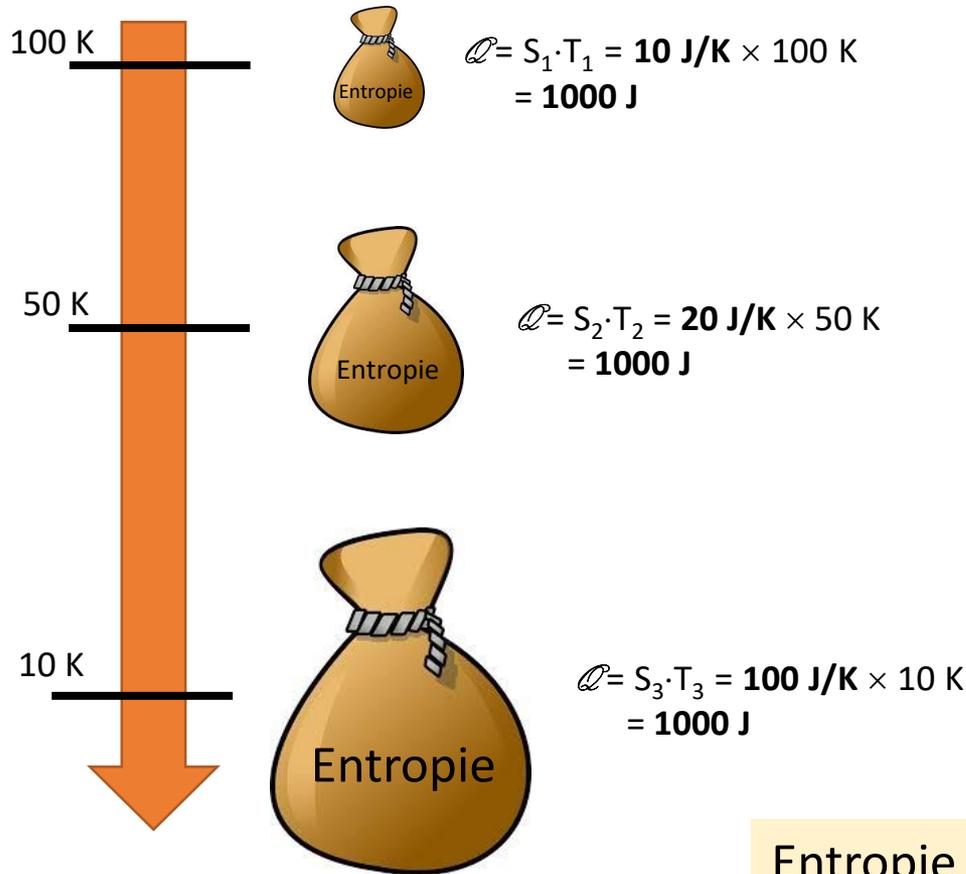
Aucune autre forme d'énergie ne peut se transformer ainsi c'est-à-dire conserver sa valeur (en J) alors que sa tension baisse (être transférée quantitativement d'une tension haute à une tension basse).





Le second principe

Illustration du transfert quantitatif d'énergie calorifique.



$$\text{Entropie créée} = 100 \text{ J/K} - 10 \text{ J/K} = 90 \text{ J/K}$$



Le second principe

❑ Pourrait-on transférer quantitativement une autre forme d'énergie que l'énergie calorifique ?

Si c'était le cas pour une bille qui chute, il faudrait créer de l'extensité masse :

100 m



$$mgz = 1 \text{ kg} \times 10 \text{ m}^2/\text{s} \times 100 \text{ m} = 1000 \text{ J}$$

50 m



$$mgz = 2 \text{ kg} \times 10 \text{ m}^2/\text{s} \times 50 \text{ m} = 1000 \text{ J}$$

10 m



$$mgz = 10 \text{ kg} \times 10 \text{ m}^2/\text{s} \times 10 \text{ m} = 1000 \text{ J}$$





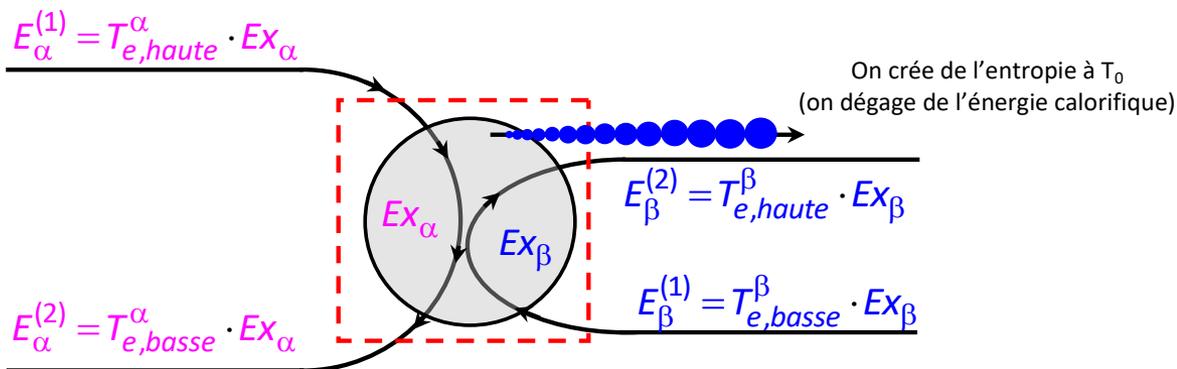
Énoncé du 2^e principe :

L'énergie calorifique est la seule forme d'énergie qui peut être transférée quantitativement.



Cas industriels

- A cause des frottements, dans les installations industrielles, les phénomènes irréversibles (dégradation d'énergie noble) sont systématiquement présents. Dans les convertisseurs d'énergie, cohabitent donc récepteur monotherme et récepteur bi-tension. Il en découle que les rendements des convertisseurs d'énergie industriels sont toujours $< 100\%$ (de l'ordre de 50% pour les moteurs industriels).



Convertisseur d'énergie

$$\underbrace{(T_{e,basse}^\alpha - T_{e,haute}^\alpha) \cdot EX_\alpha}_{\Delta E_\alpha < 0} = - \left[\underbrace{(T_{e,haute}^\beta - T_{e,basse}^\beta) \cdot EX_\beta}_{\Delta E_\beta > 0} + T_0 \cdot S_{créée} \right]$$

$$\eta = \frac{\Delta E_\beta}{|\Delta E_\alpha|} = \frac{|\Delta E_\alpha| - T_0 \cdot S_{créée}}{|\Delta E_\alpha|} = 1 - \frac{T_0 \cdot S_{créée}}{|\Delta E_\alpha|} < 1$$



Les phénomènes irréversibles sont économiquement néfastes.

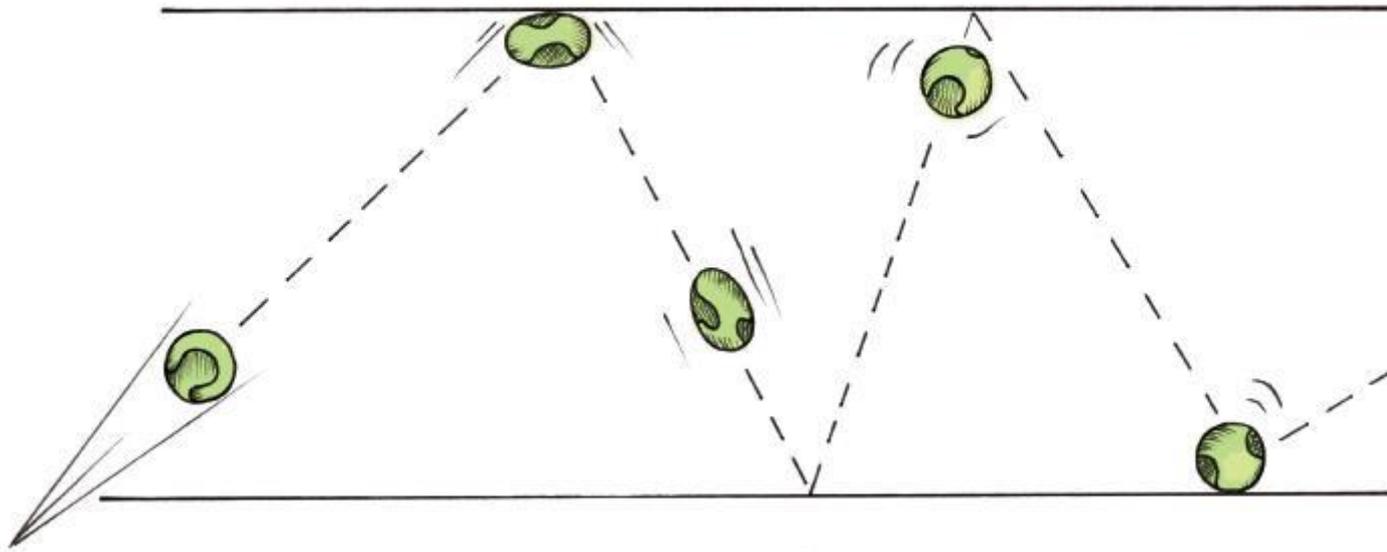


Conclusions :



Sans la création d'entropie, les frottements ne pourraient exister et le « le Monde serait sillonné de pierres volant et rebondissant perpétuellement en tout sens »

Professeur Maurice Dodé.



au 2nd principe !



**Merci pour votre
attention**

