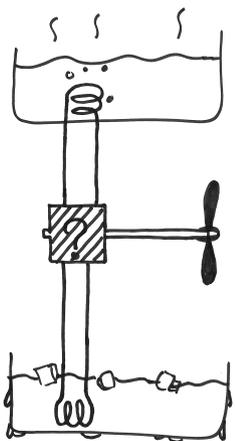


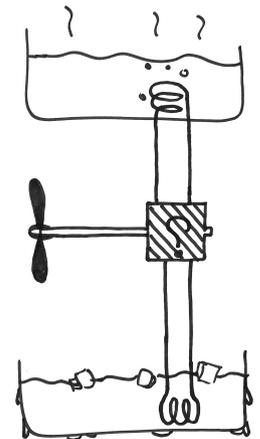
Cours 7

Le second principe



We must not make a scarecrow of the law,
Setting it up to fear the birds of prey,
And let it keep one shape, till custom make it
Their perch and not their terror.

ANGELO — *Measure for Measure*, II i



~ nota bene ~

- Ces diapositives servent de support en classe ; elles n'ont pas vocation de remplacer un polycopié (ou un bon livre!)
- Certaines diapositives paraîtront inévitablement ambiguës ; attention à ne pas les interpréter sans l'aide des documents de cours.

Vos retours d'opinion sont les bienvenus :

olivier.cleynen@ariadacapo.net

Ces documents de cours sont téléchargeables
à l'adresse

<http://thermo.ariadacapo.net/>

Ce document est publié
sous licence Creative Commons.



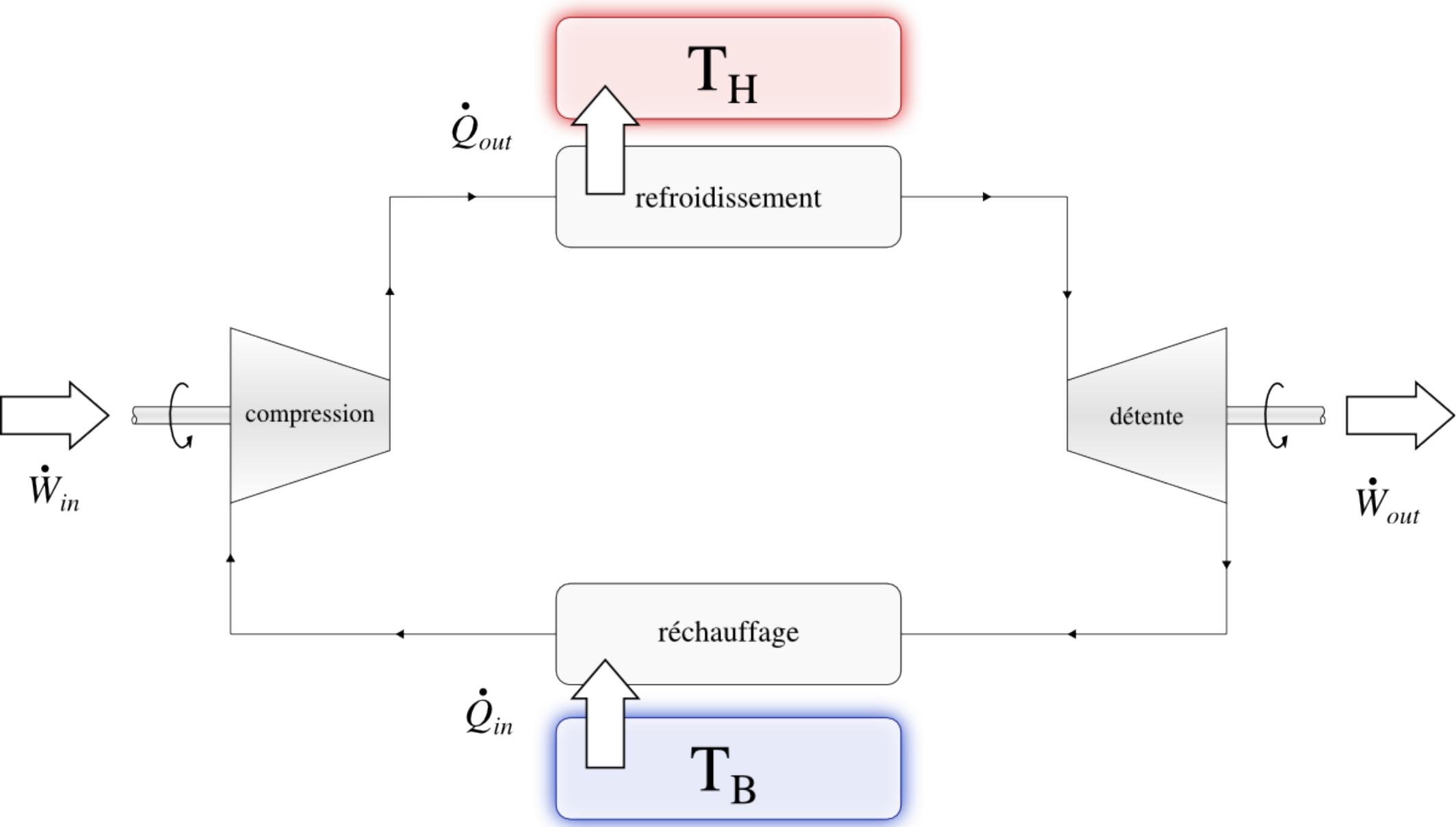
Certains documents sont le fruit du travail des auteurs indiqués
au bas des diapositives, et publiés sous licence compatible.

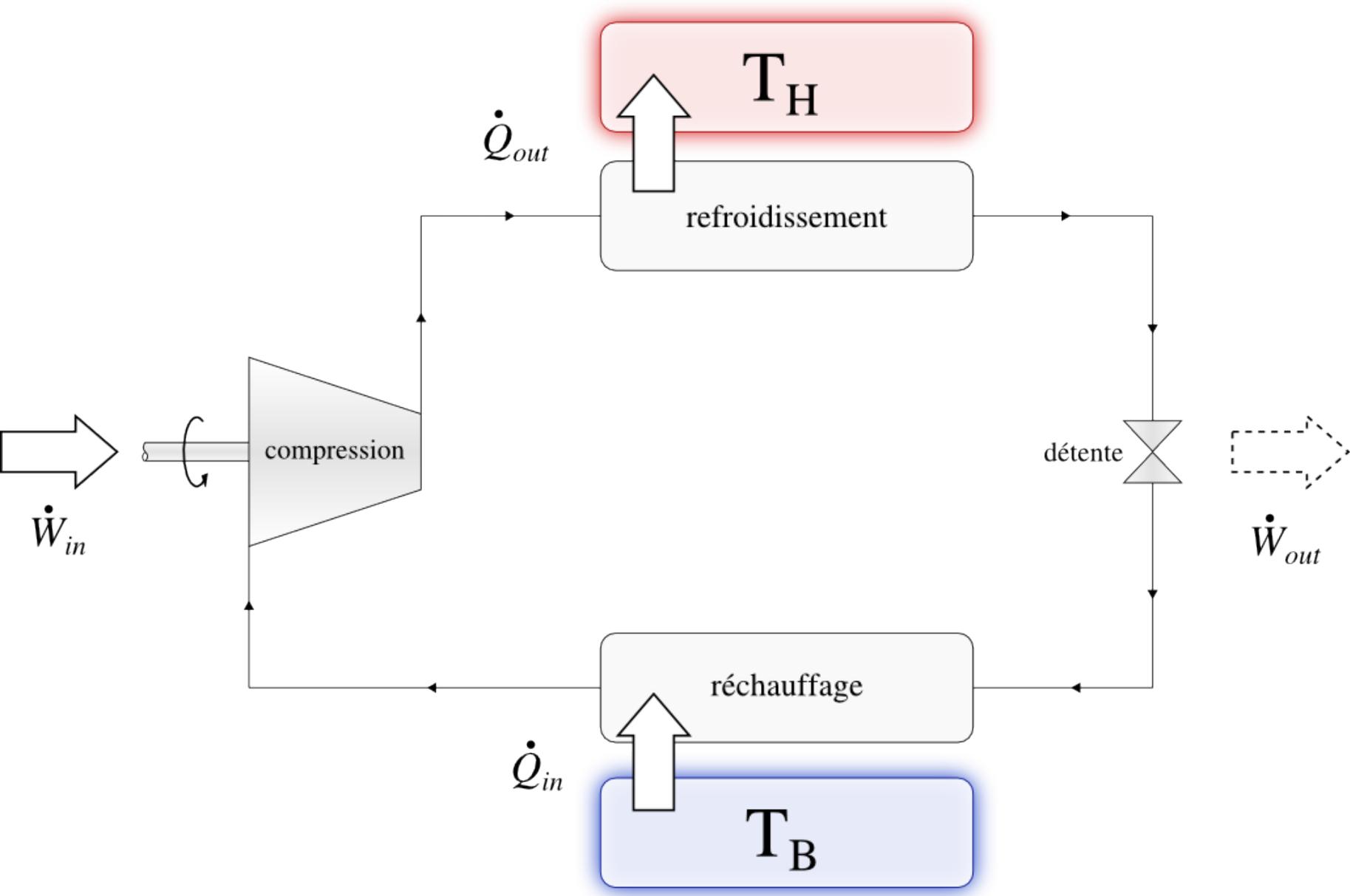
Le reste est ©2009-2013 CC by-sa Olivier Cleynen

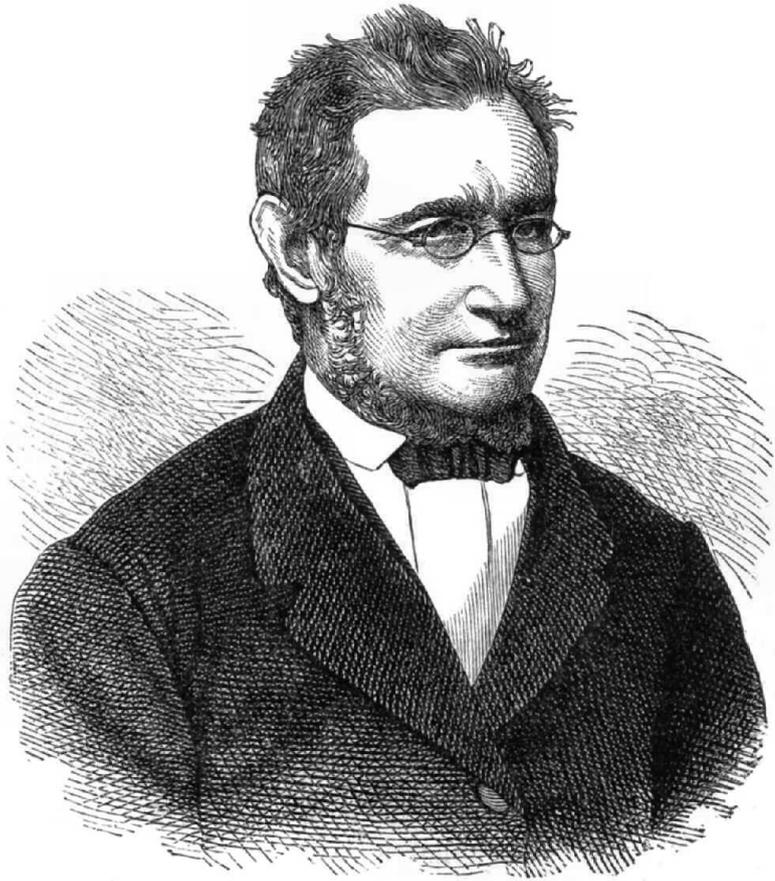
Vous êtes invité/es à copier, modifier, et ré-utiliser ce
document sous quelques conditions simples :

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.fr>

Introduction

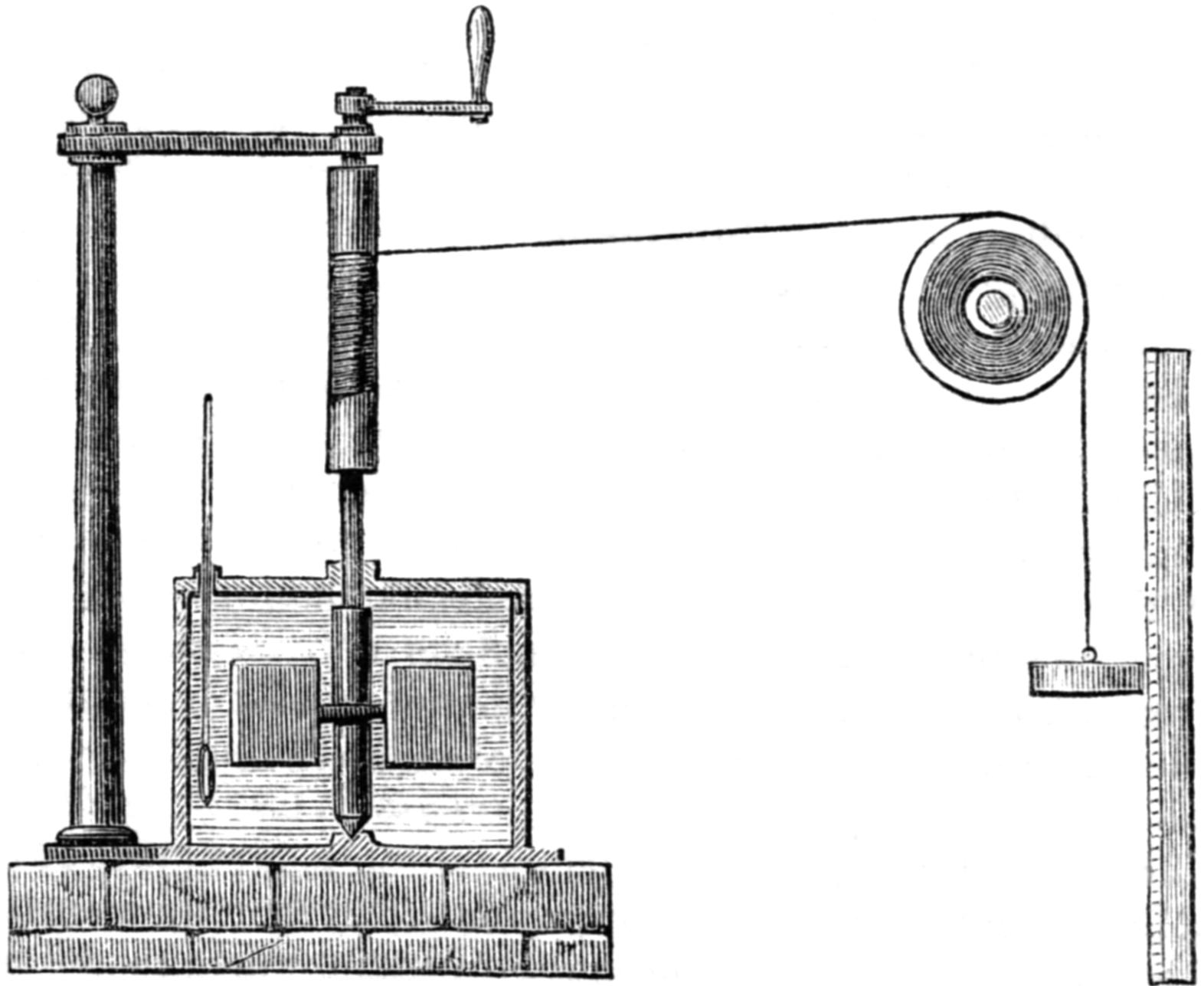






*« Die organische Bewegung
im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel »*

$$Q + W = \Delta U$$



von Mayer

Newton (N)

Joule (J)

Watt (W)

Mayer (M)



Quelle quantité de charbon faut-il
pour alimenter un moteur donné ?

7.1 Le second principe

7.1.1 Énoncé

CHAUD

chaleur



FROID

Çengel :

“Il est impossible de concevoir une machine décrivant un cycle et qui n’aurait d’autre effet que de produire un travail et échanger de la chaleur avec un seul réservoir thermique”

Eastop :

“In any cycle, the gross heat supplied
plus the net work input
must be greater than zero.”

Parisi :

Considérons un système subissant une transformation élémentaire au cours de laquelle une chaleur reçue dQ est échangée à travers la frontière du système,

dont la température est T_f ,

Parisi : (suite)

La variation de la fonction d'état extensive du système, dS , est telle que

$$dS = \frac{\delta Q}{T_F} + \delta S_C$$

$$\delta S_C \geq 0$$

CHAUD

chaleur



FROID

« La chaleur ne se déplace spontanément que vers une température plus basse »

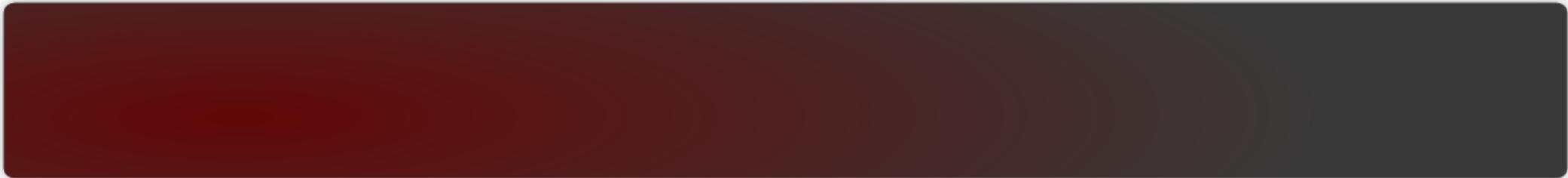
« Le transfert de chaleur vers une température plus haute ne peut se faire qu'avec un apport d'énergie. »



7.1.2 De l'évidence du second principe









chaleur

=

énergie cinétique

température

=

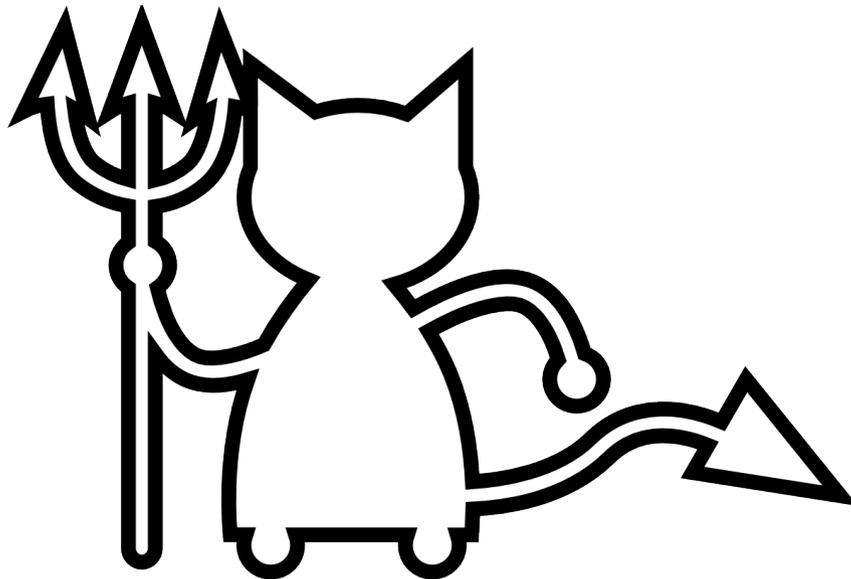
vitesse

et bien non.



Affaire à suivre...

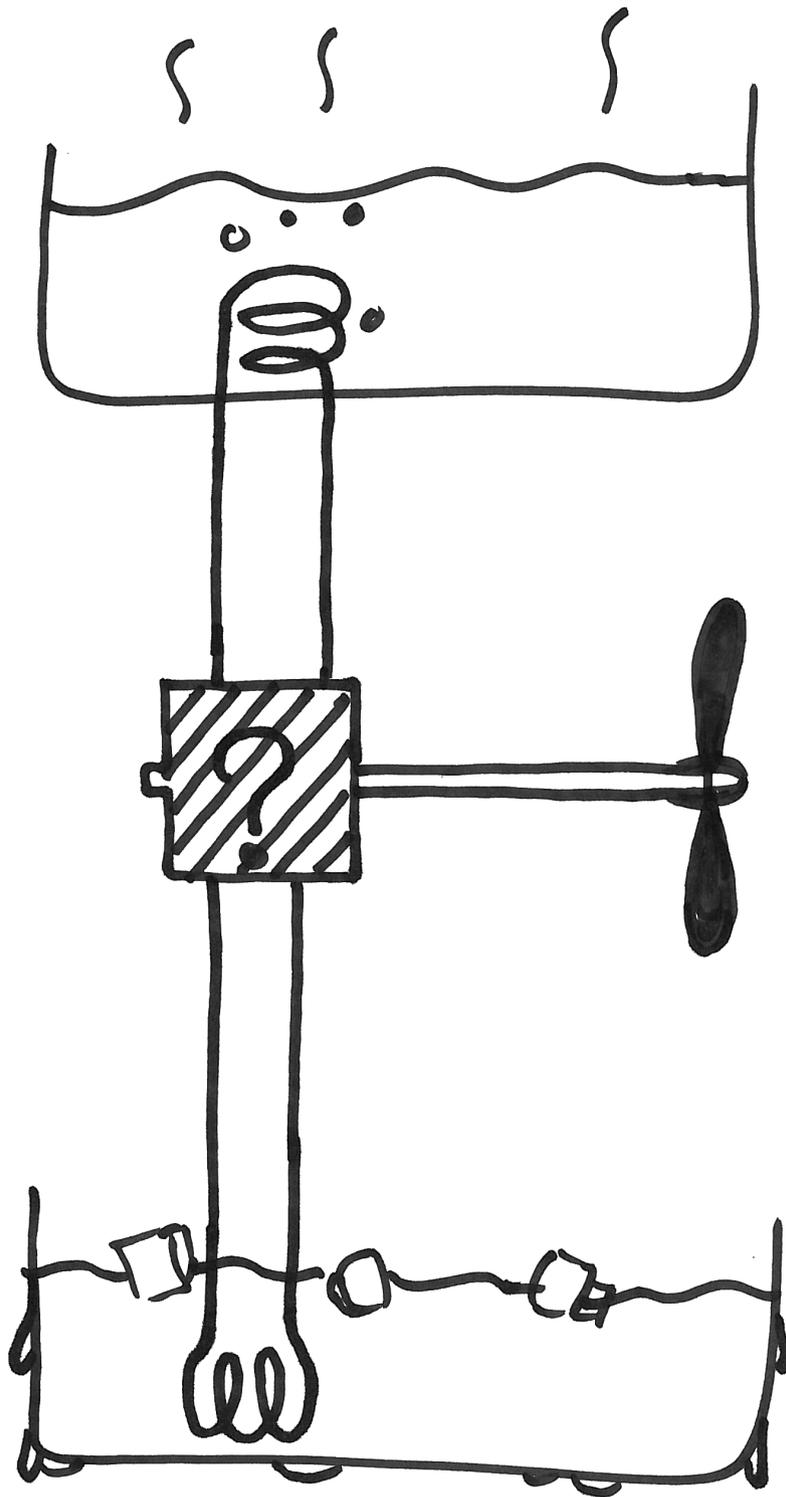
Le démon de Maxwell



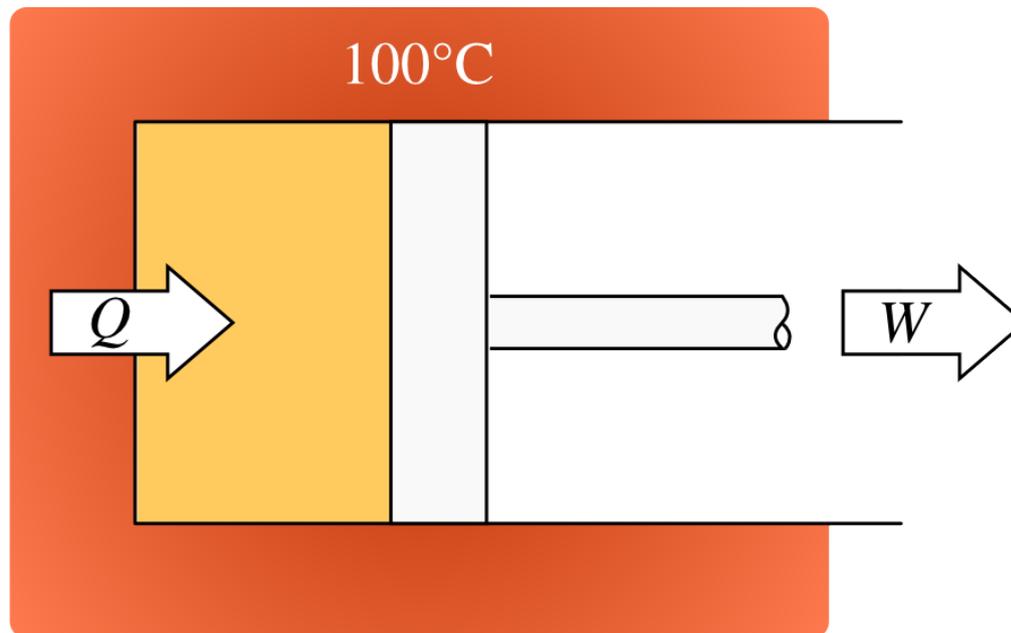
7.1.3

Tous les moteurs rejettent de la chaleur

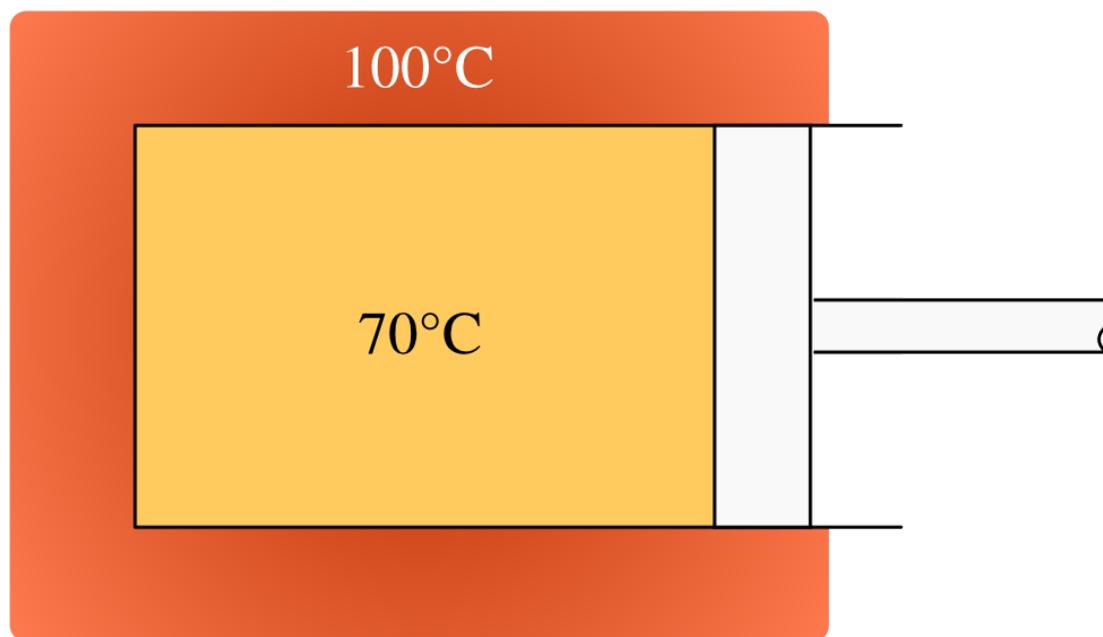
~ et c'est bien dommage ~



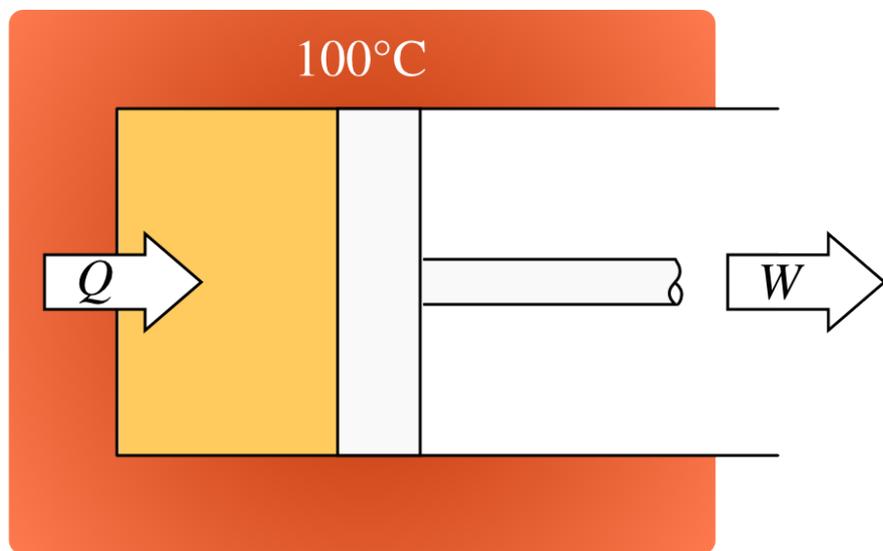
(A)



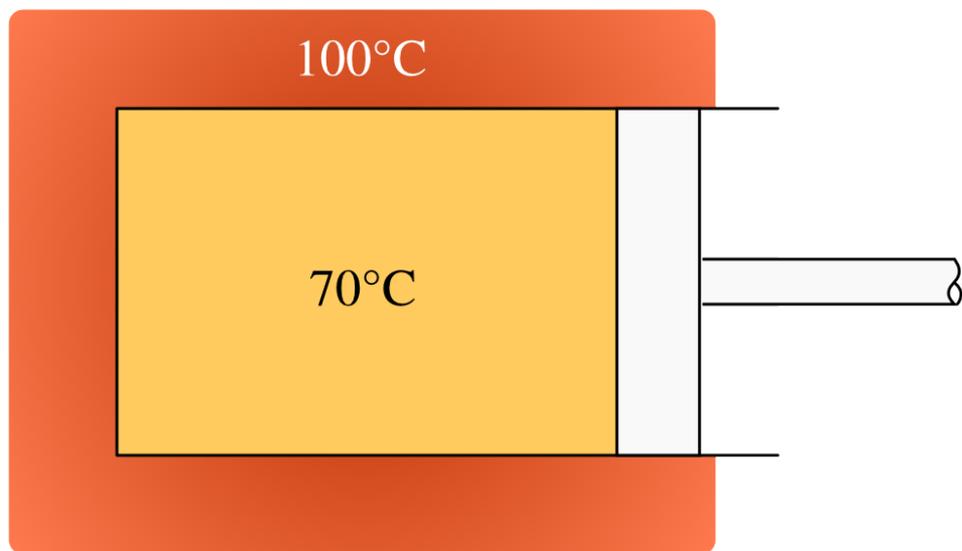
(B)



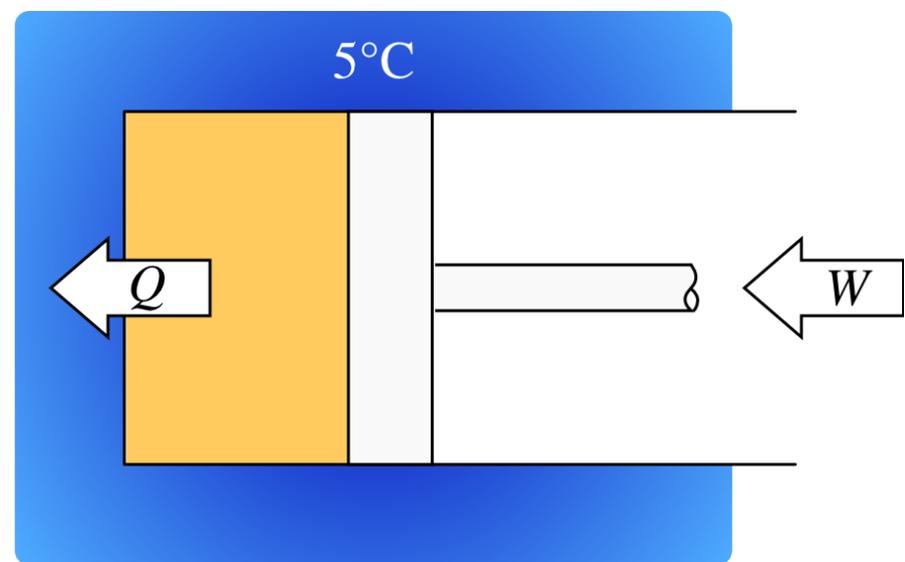
(A)



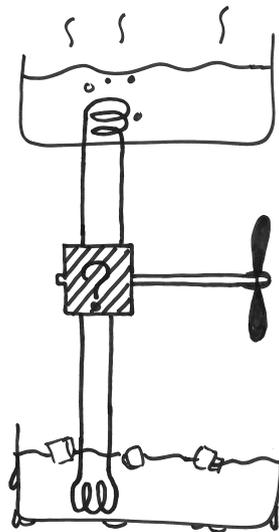
(B)

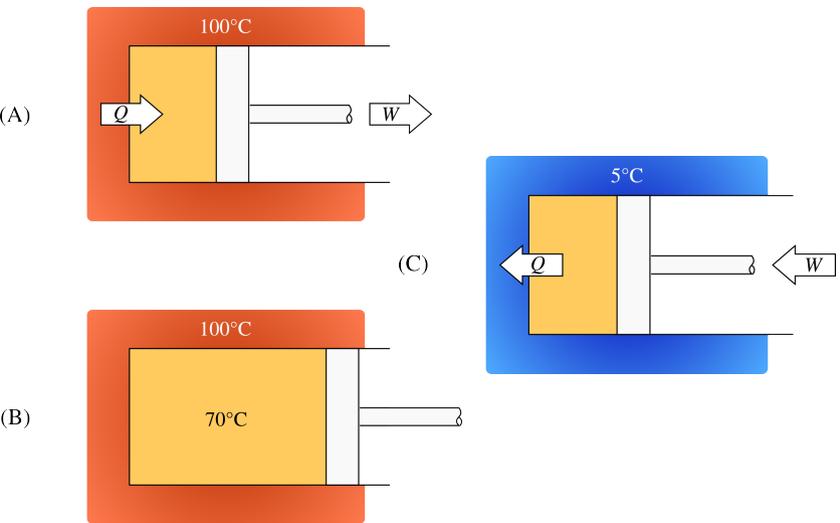


(C)



Pour créer du travail en continu,
il nous faudra toujours rejeter de la chaleur
à une température plus basse



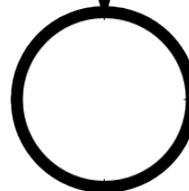


Il faudra toujours *deux températures*
pour transformer de la chaleur en travail

7.2 Le second principe et les machines

Température Haute
 T_H

Q_{TH}



W_{net}

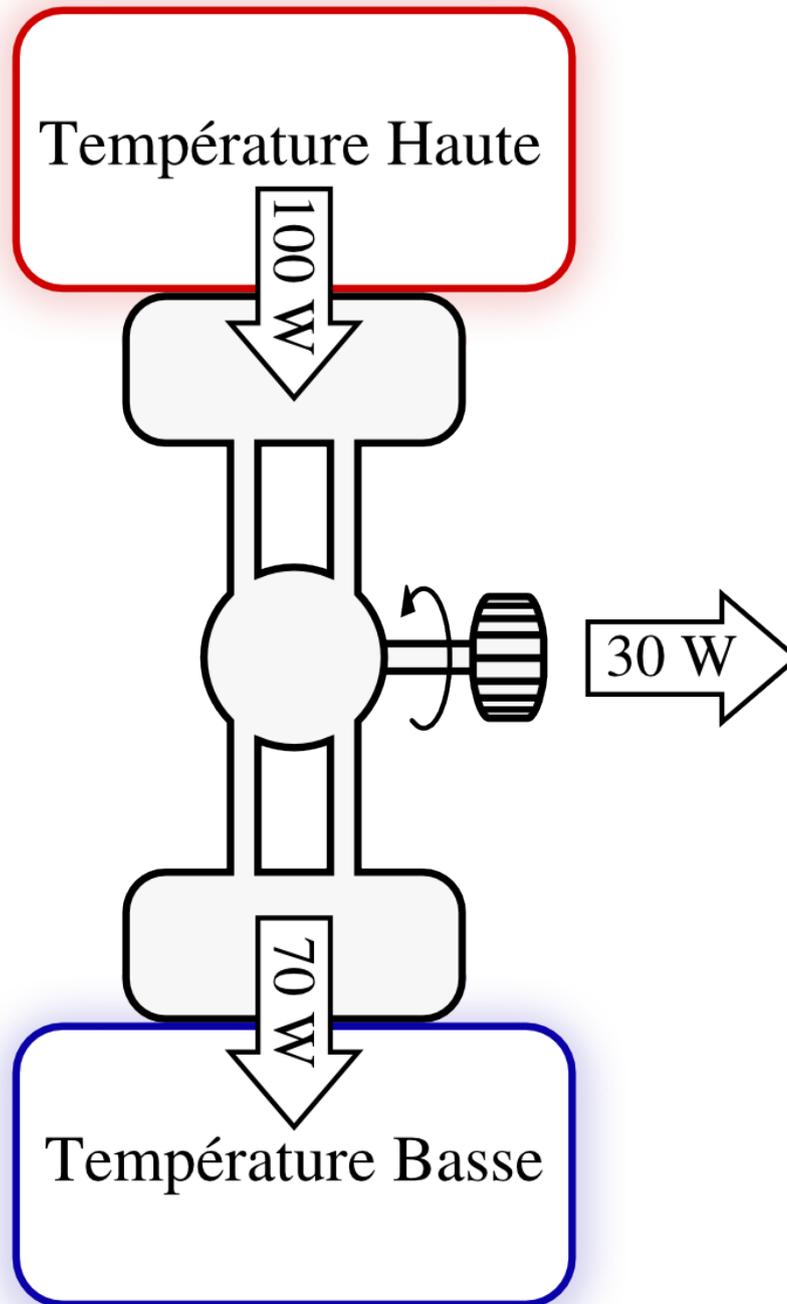
Q_{TB}

Température Basse
 T_B

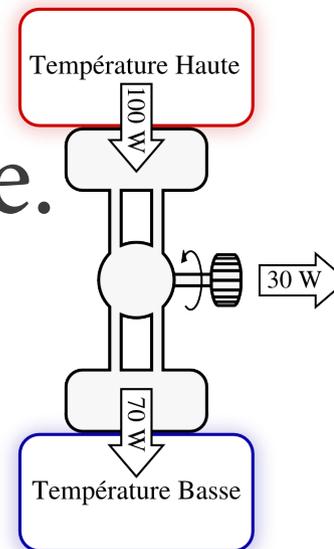
$$\dot{Q}_{TH} + \dot{Q}_{TB} + \dot{W}_{net} = 0$$

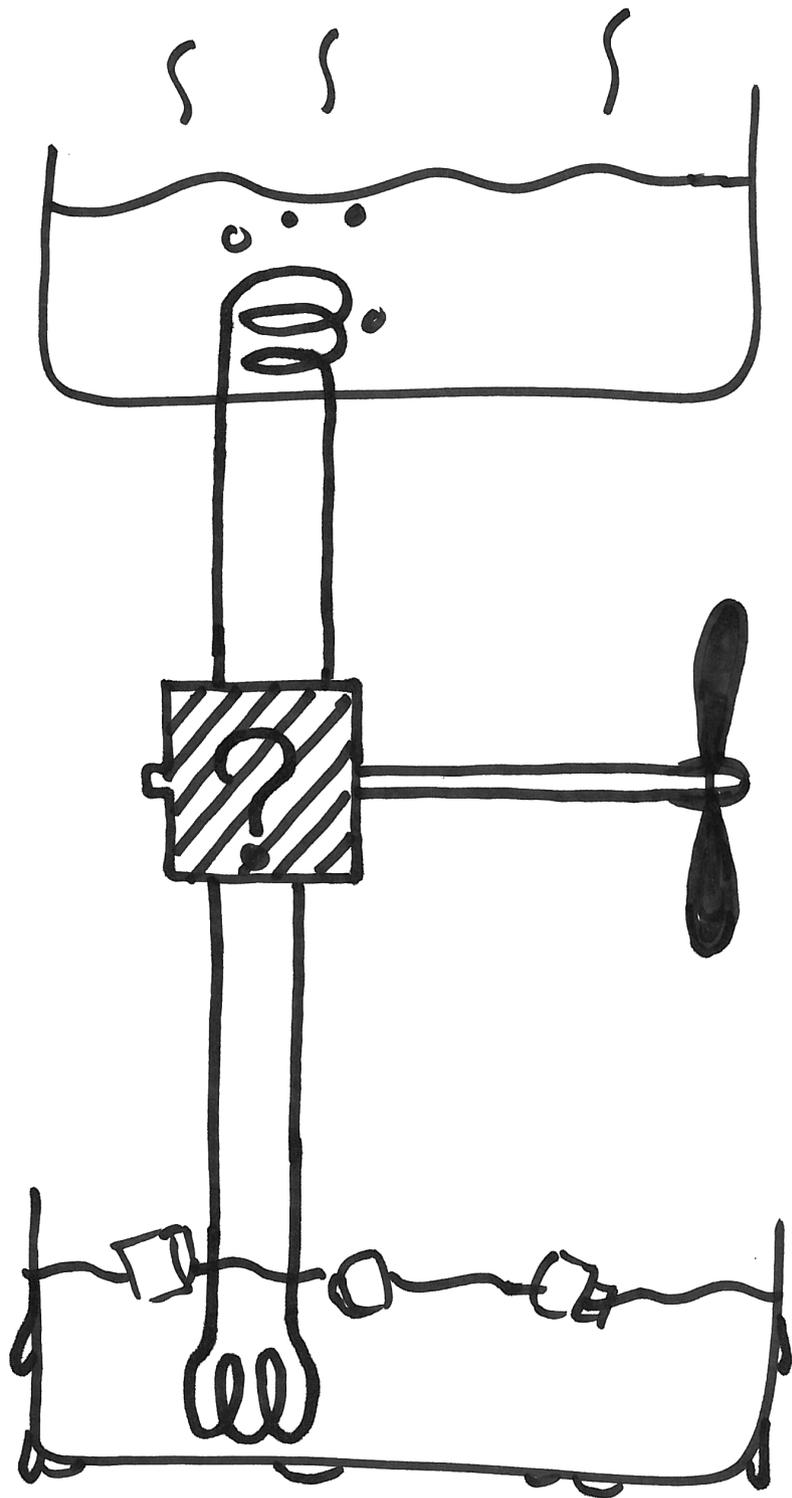
(7/1)

Le moteur



Il est impossible pour une machine thermique
de produire un travail sur un cycle
si elle n'échange de la chaleur
qu'avec un seul réservoir thermique.





$$\dot{Q}_{TH} > -\dot{W}_{net}$$

(7/2)

La machine inversée

(le réfrigérateur)

Température Haute

100 W

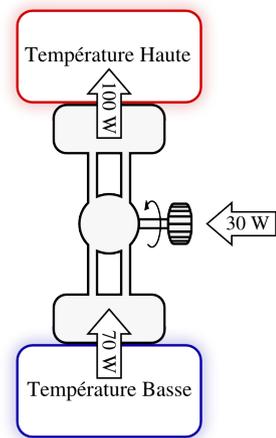


30 W

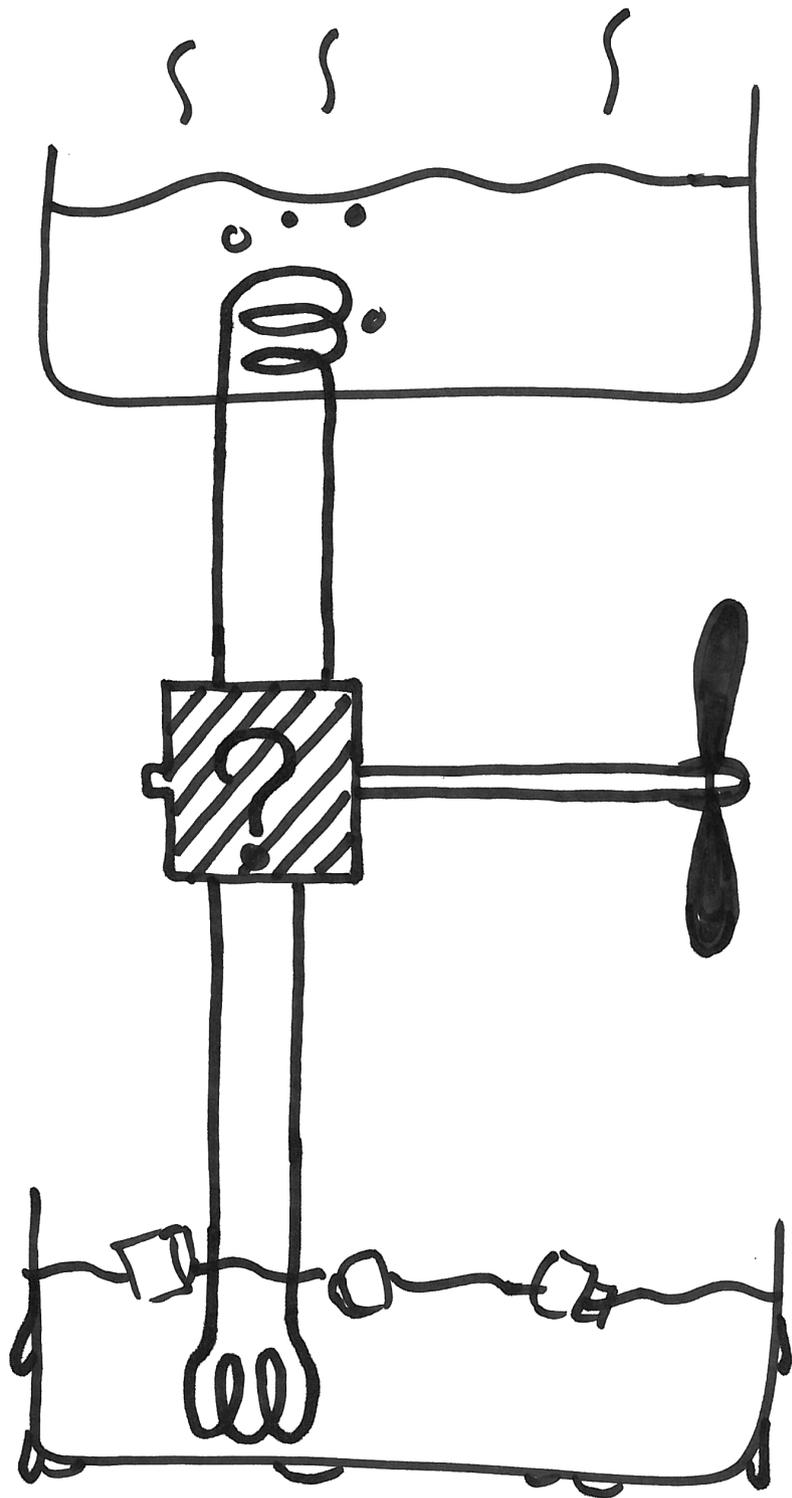


70 W

Température Basse



Il est impossible de concevoir une machine
qui n'ait d'autre effet
que de transférer de la chaleur depuis un corps
vers un autre de température plus haute.



$$\dot{W}_{net} > 0$$

(7/3)

7.3 Le cycle de Carnot

7.3.1 Un peu d'histoire

Newton

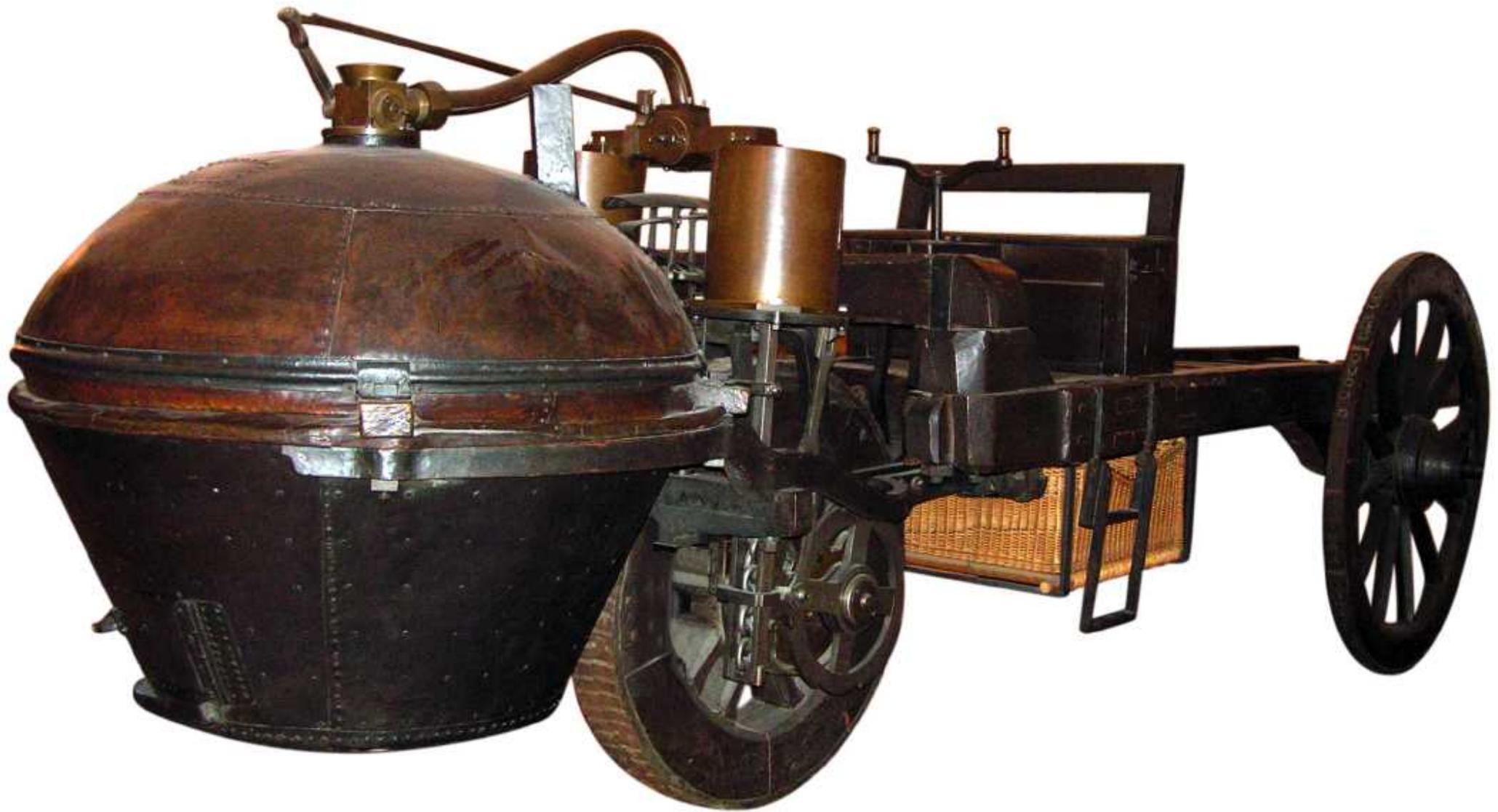
Watt

Joule

~~Mayer~~







Cugnot



Lavoisier



Sadi Carnot

Réflexions sur la puissance motrice du feu
et sur les machines propres
à développer cette puissance

1824

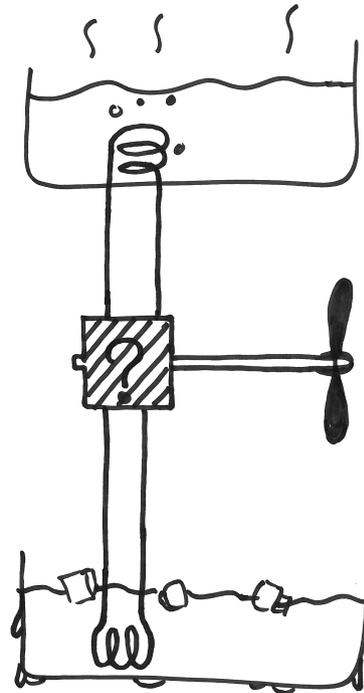
7.3.2 Concept de machine réversible

(1)

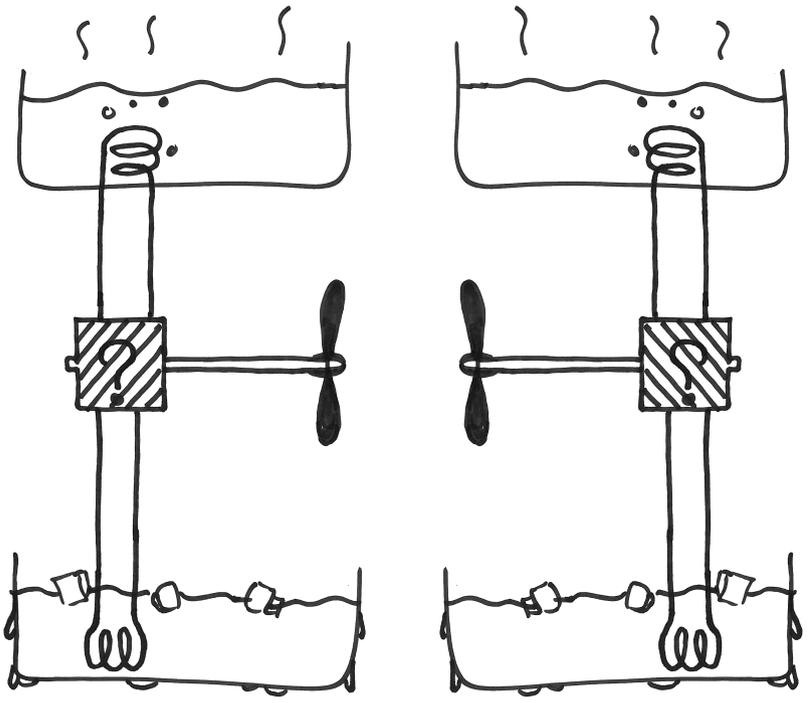
Une façon unique de transformer chaleur et travail

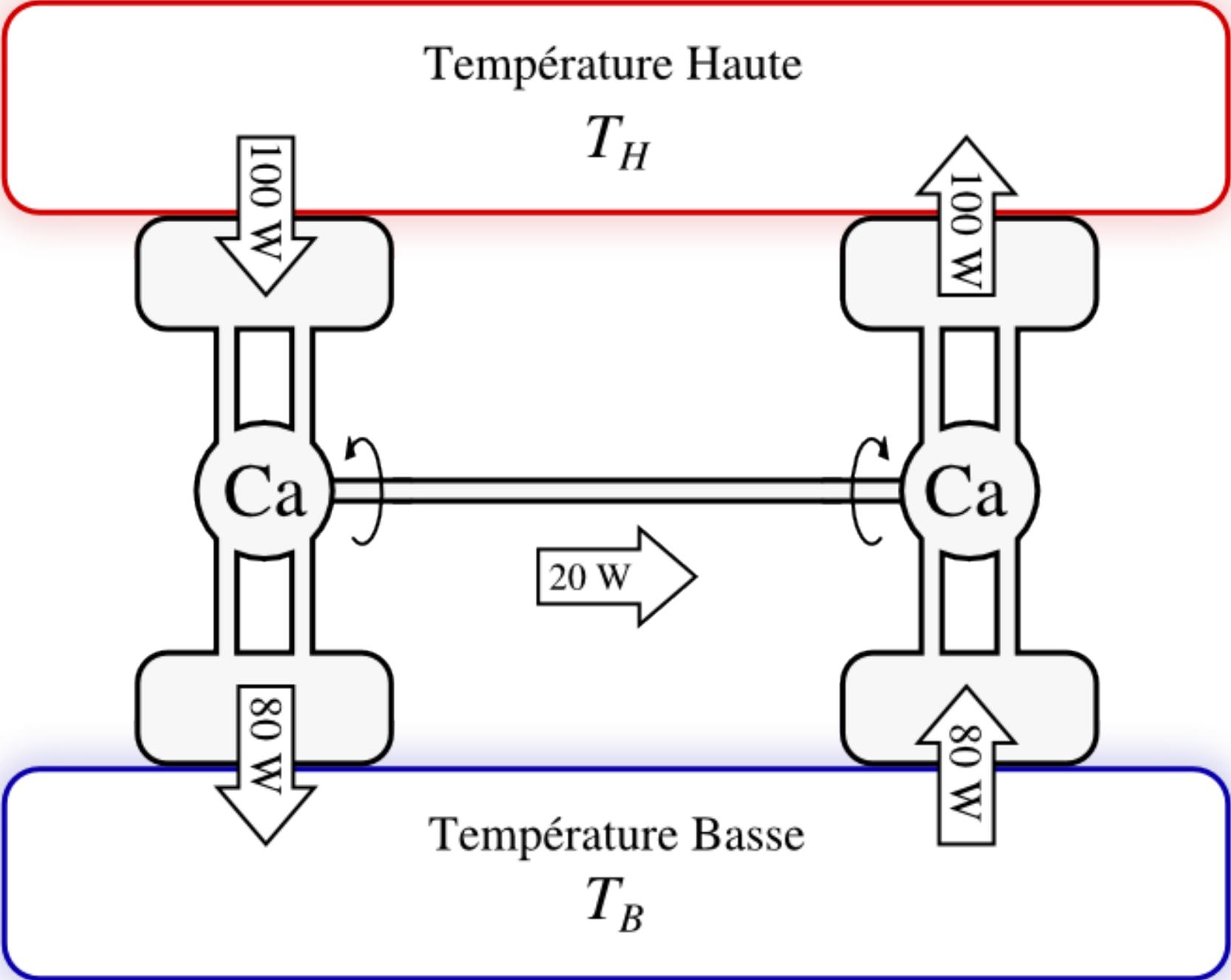
(dans un sens comme dans l'autre)

Moteur \leftrightarrow Réfrigérateur



Si le moteur alimente le réfrigérateur,
alors tous les flux de chaleur seront inversés

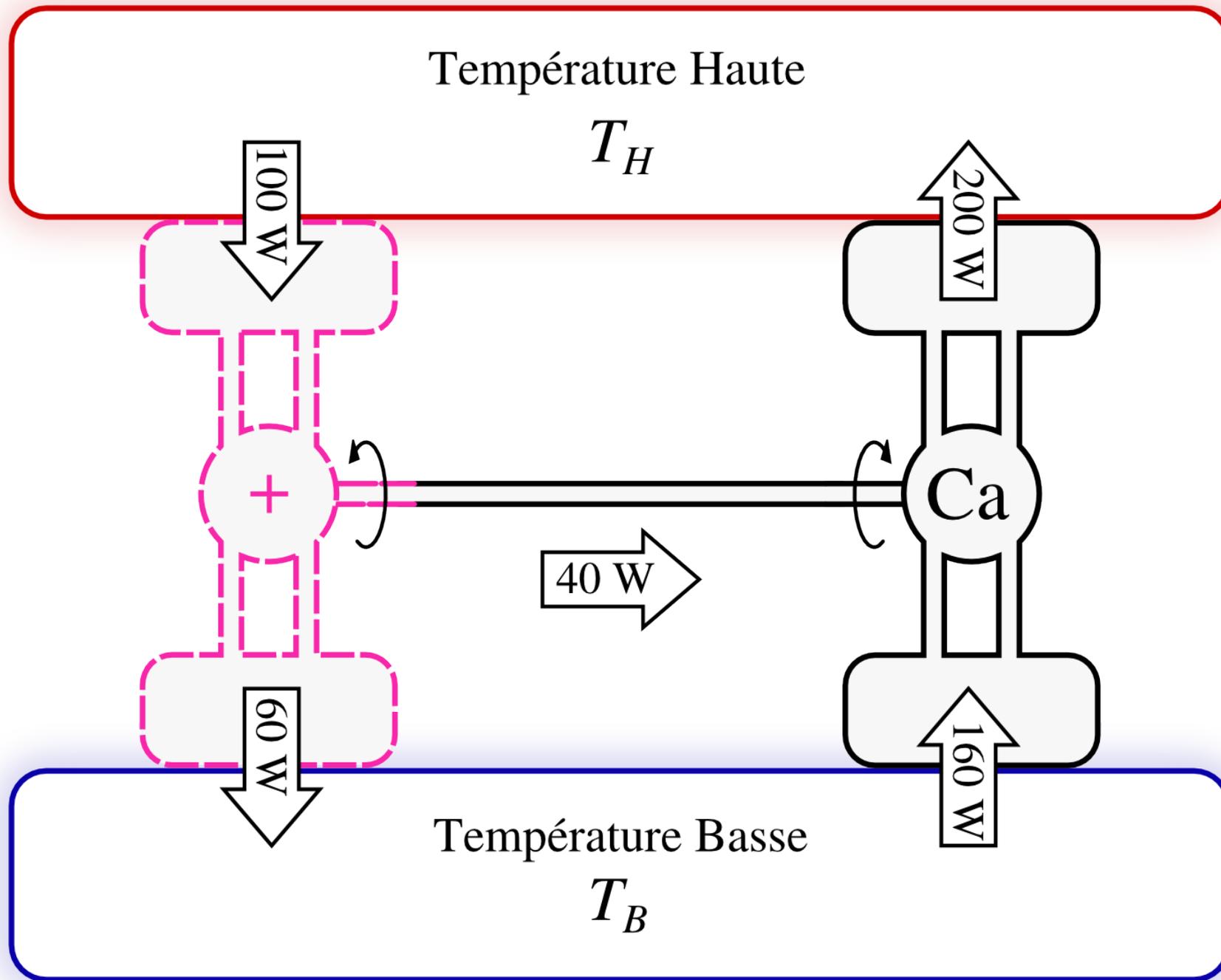




7.3.3 Clés du fonctionnement de la machine de Carnot

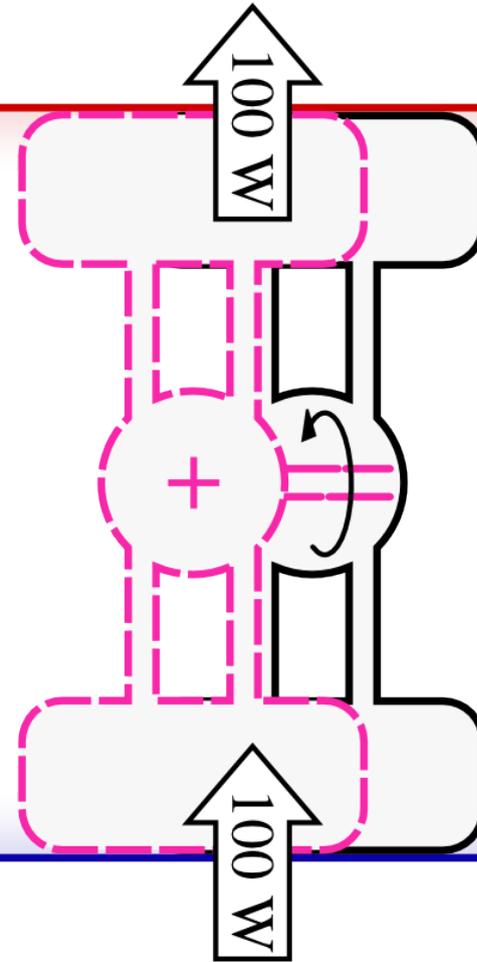
Efficacité max :

ré – ver – sible



Température Haute

T_H

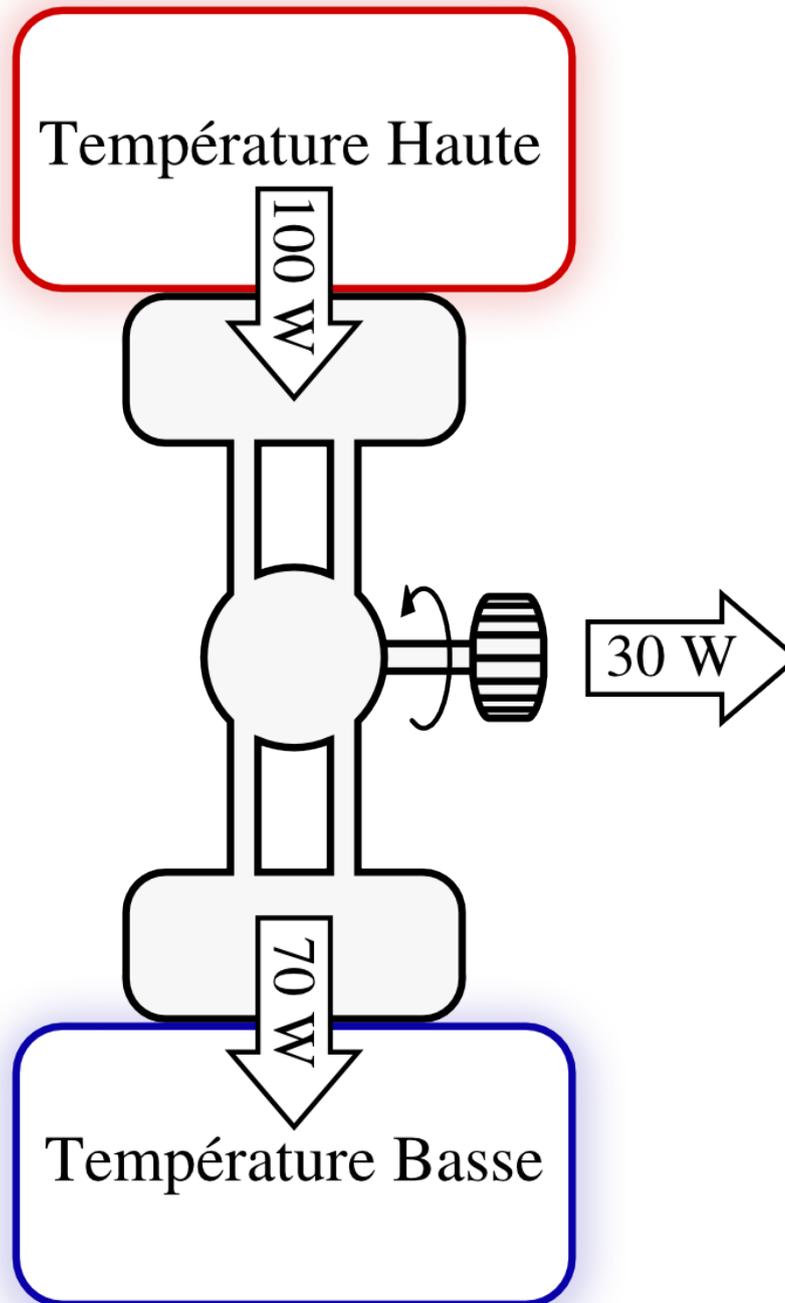


Température Basse

T_B

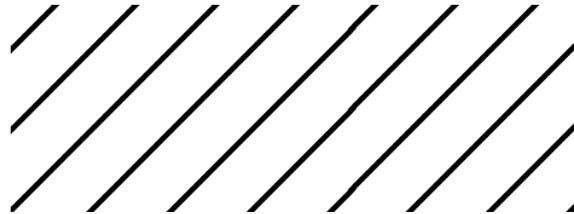
7.3.4 Fonctionnement du moteur de Carnot

ré – ver – sible



Compressions et détente :

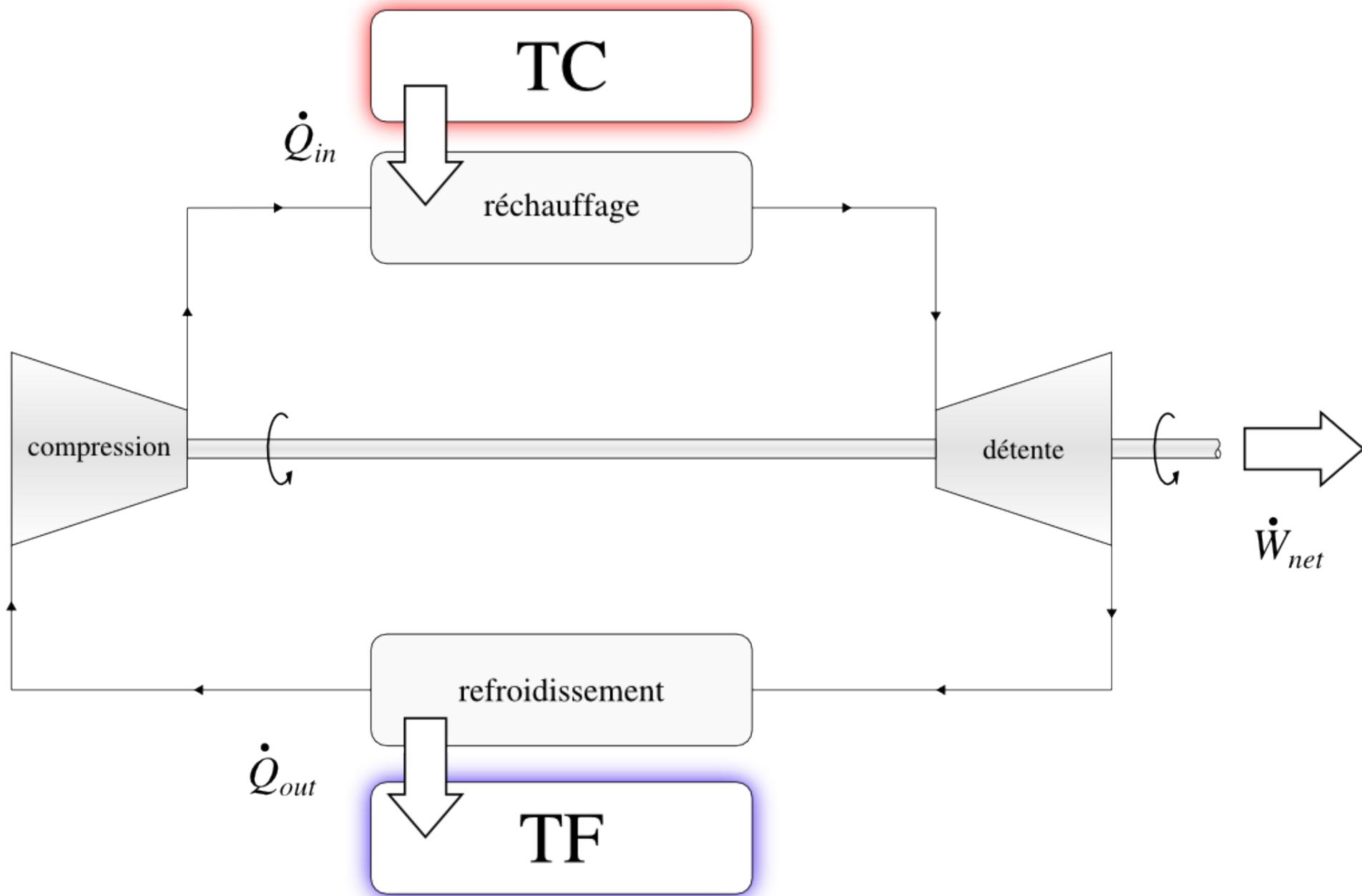
Adiabatiques réversibles

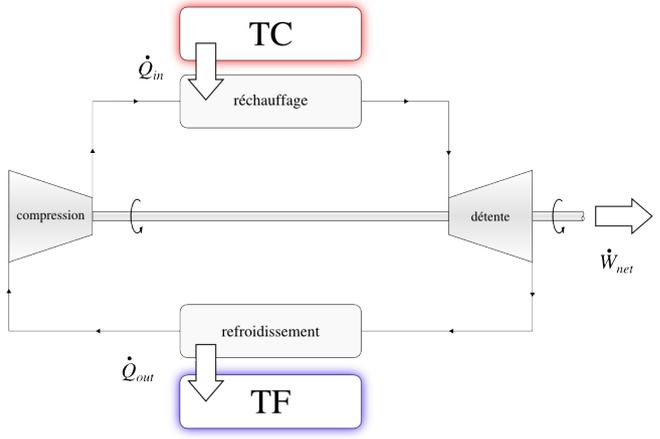


Transferts de chaleur :

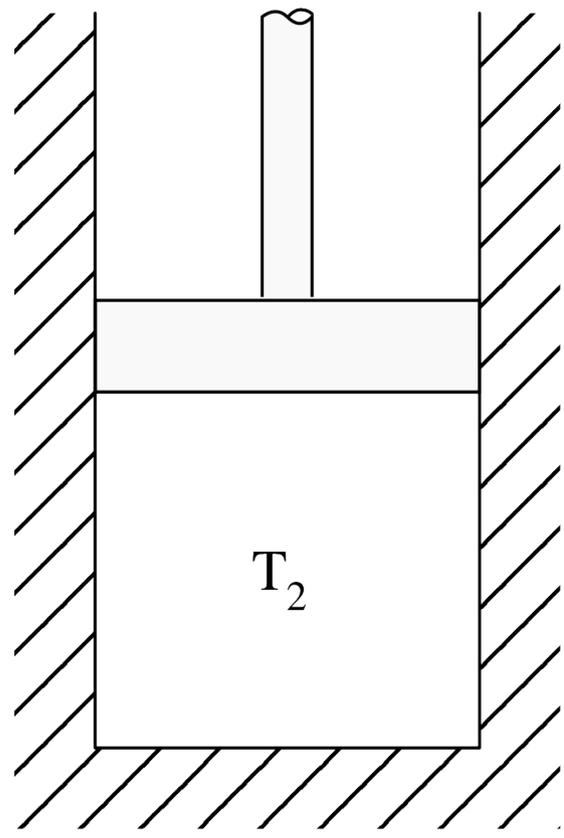
Isothermes

T_1

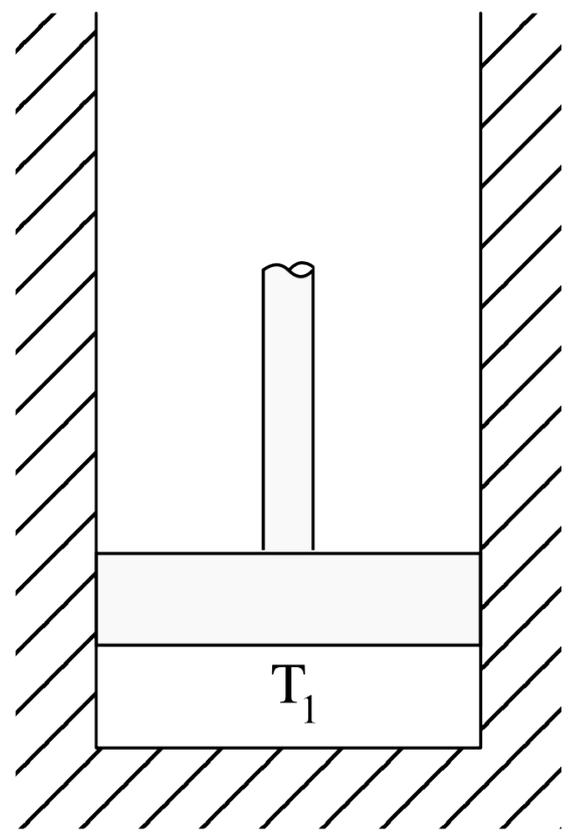




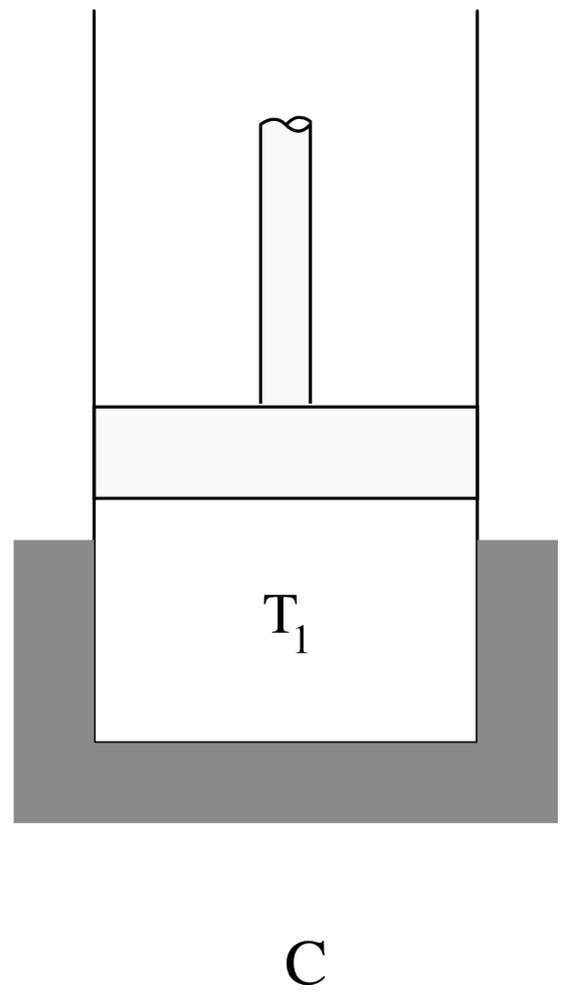
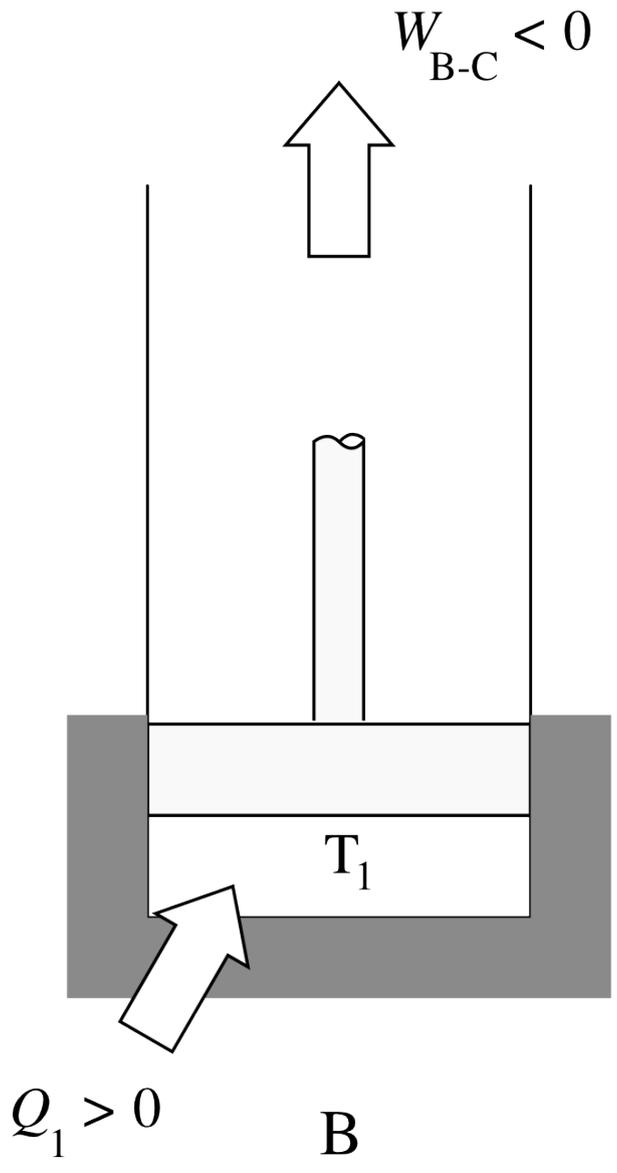
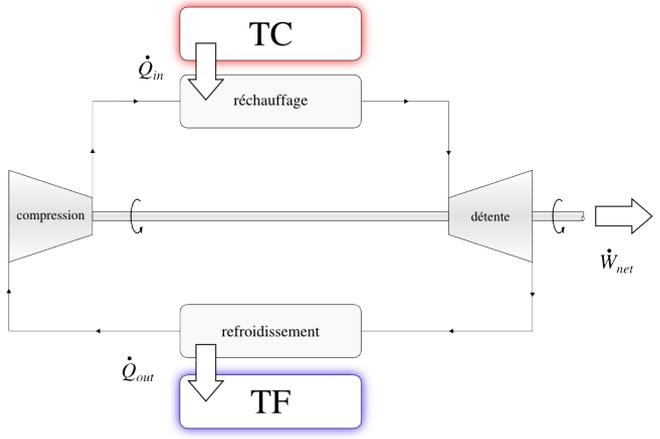
$$W_{A-B} > 0$$

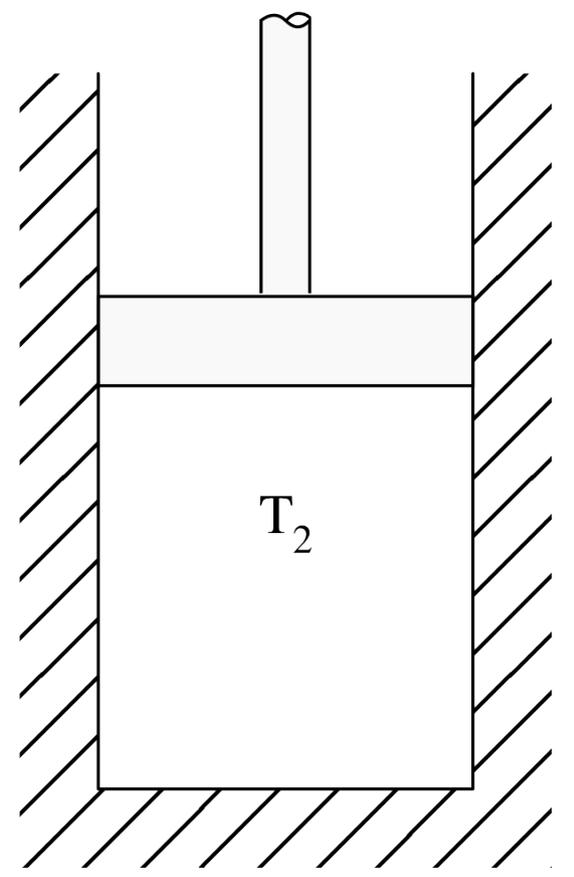
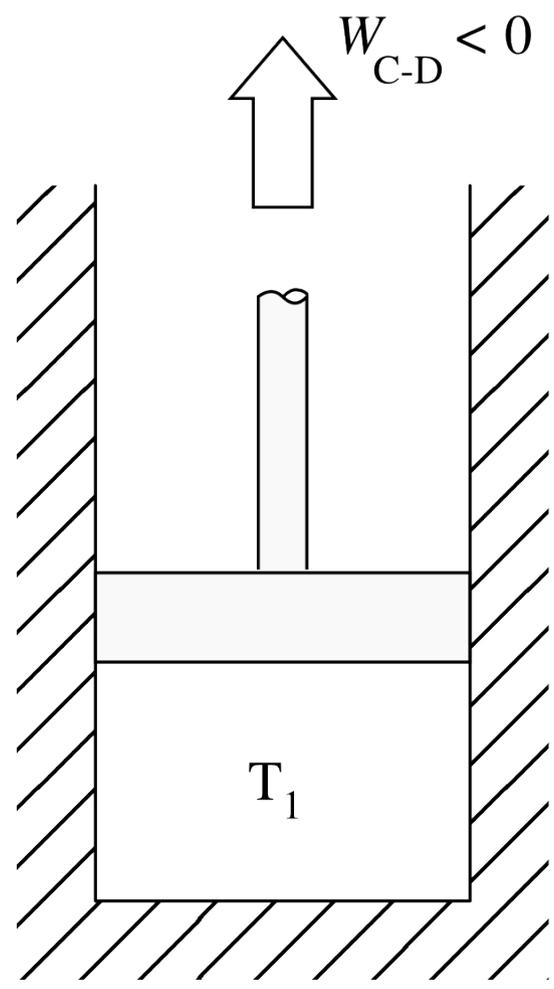
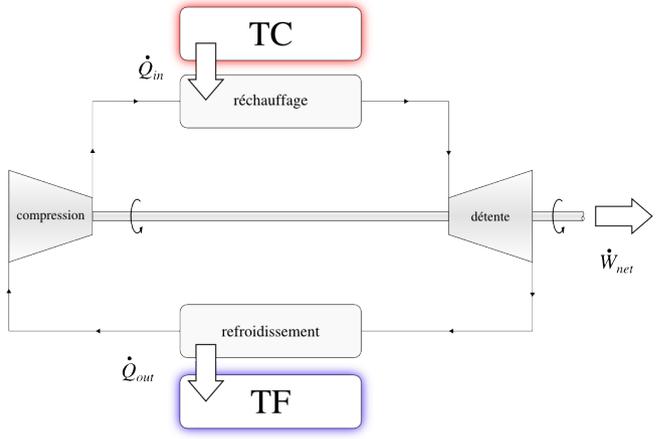


A



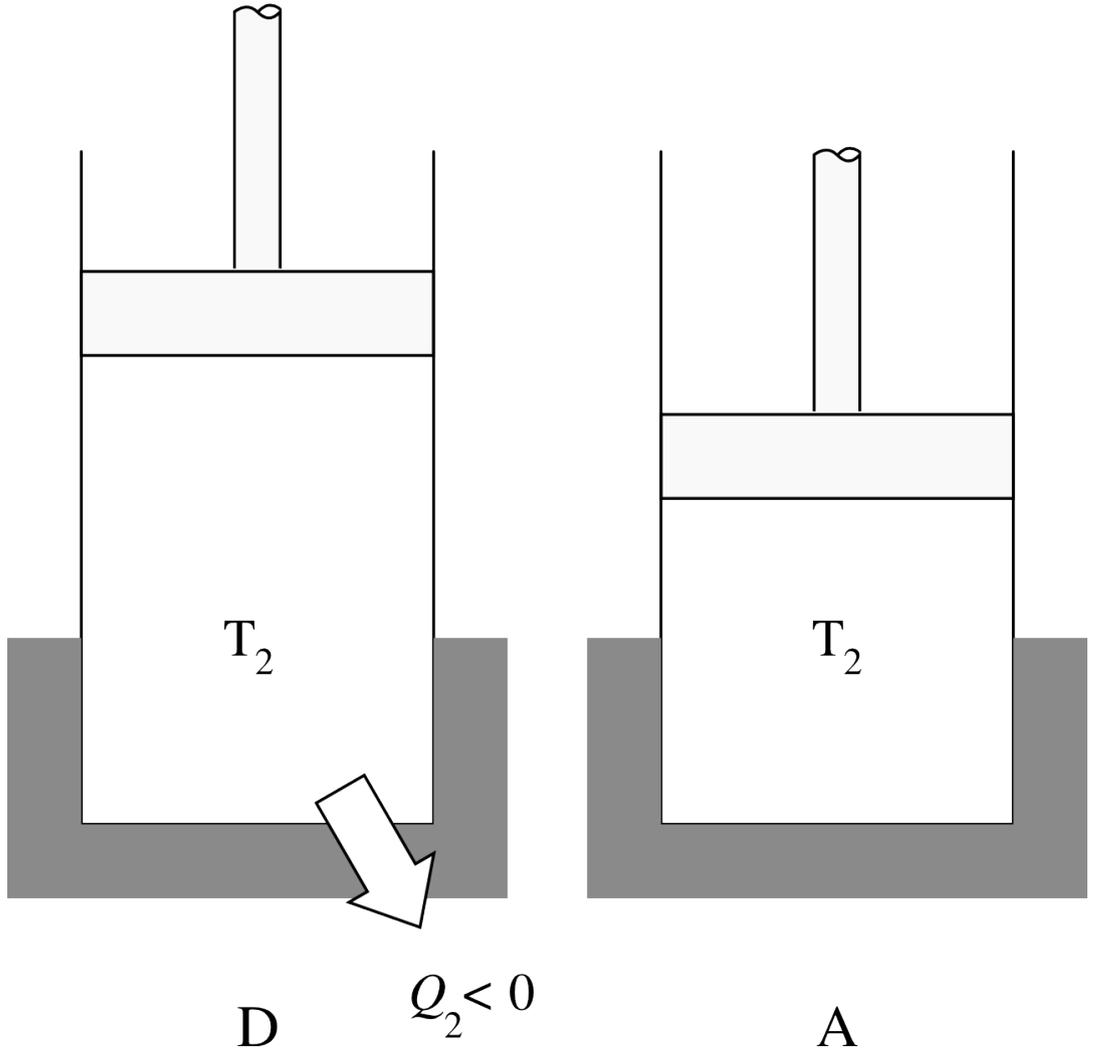
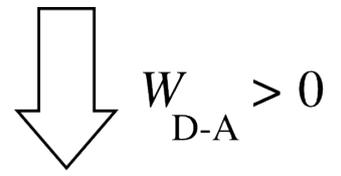
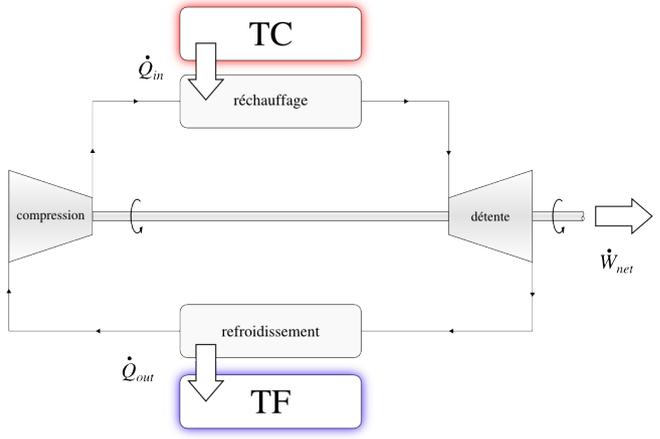
B

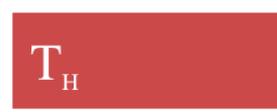
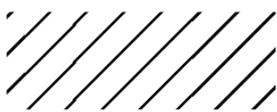
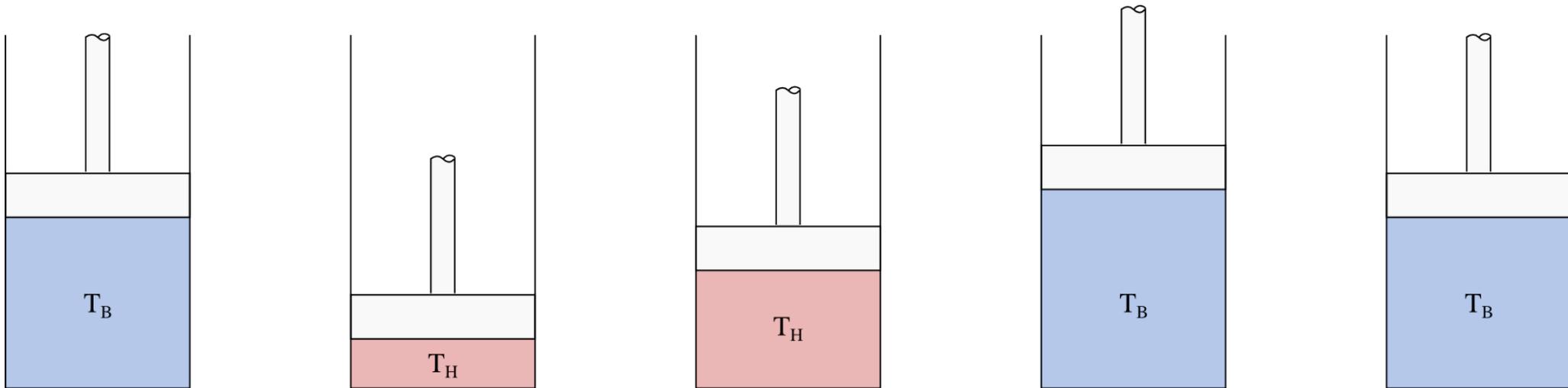




C

D





Compression adiabatique réversible

Transfert de chaleur isotherme

Détente adiabatique réversible

Transfert de chaleur isotherme

$$W_{1 \rightarrow 2} > 0$$

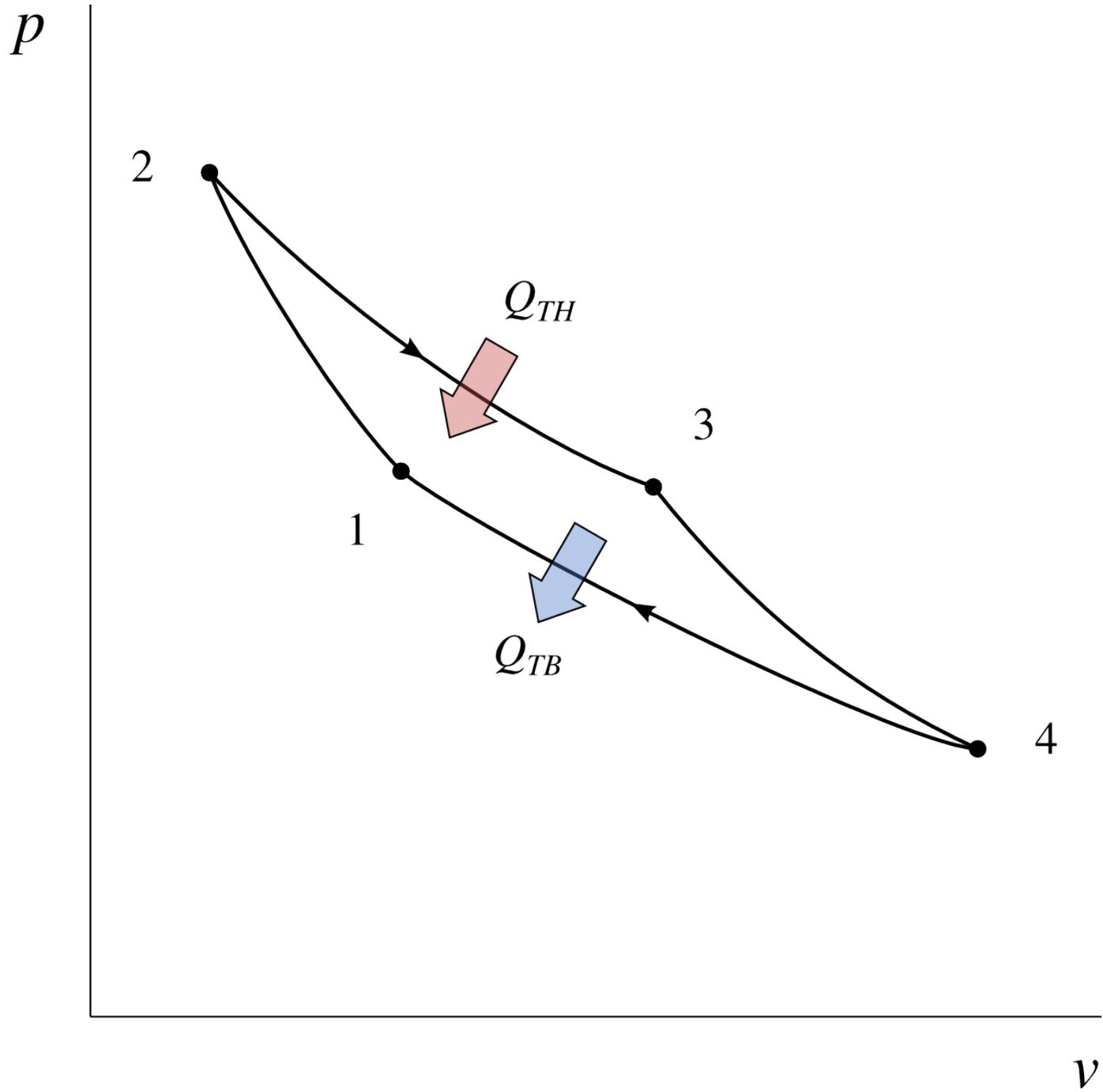
$$W_{2 \rightarrow 3} < 0$$

$$W_{3 \rightarrow 4} < 0$$

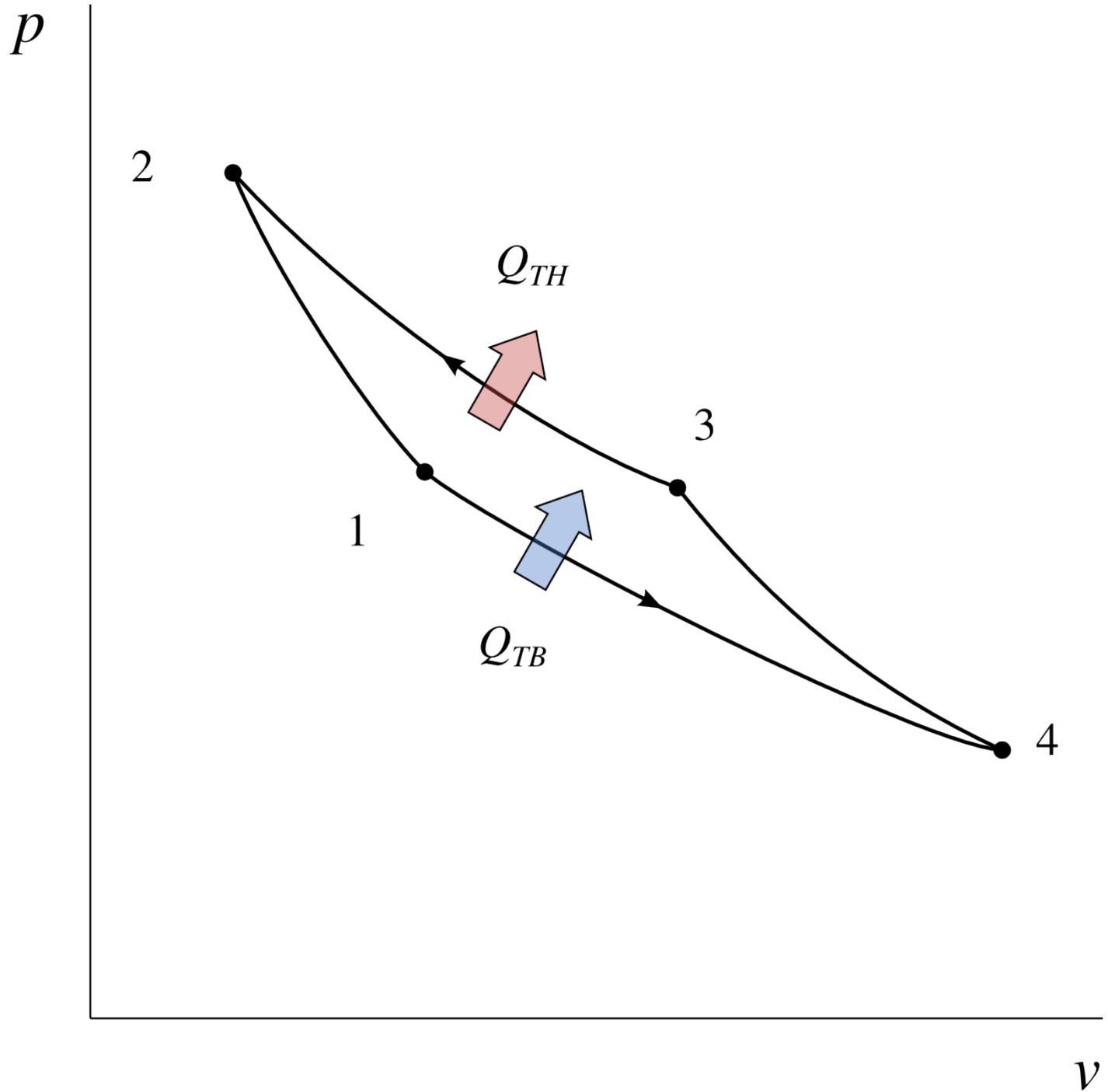
$$W_{4 \rightarrow 1} > 0$$

$$Q_{TH} > 0$$

$$Q_{TB} < 0$$

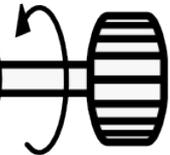


7.3.5 Le réfrigérateur de Carnot



Température Haute

100 W



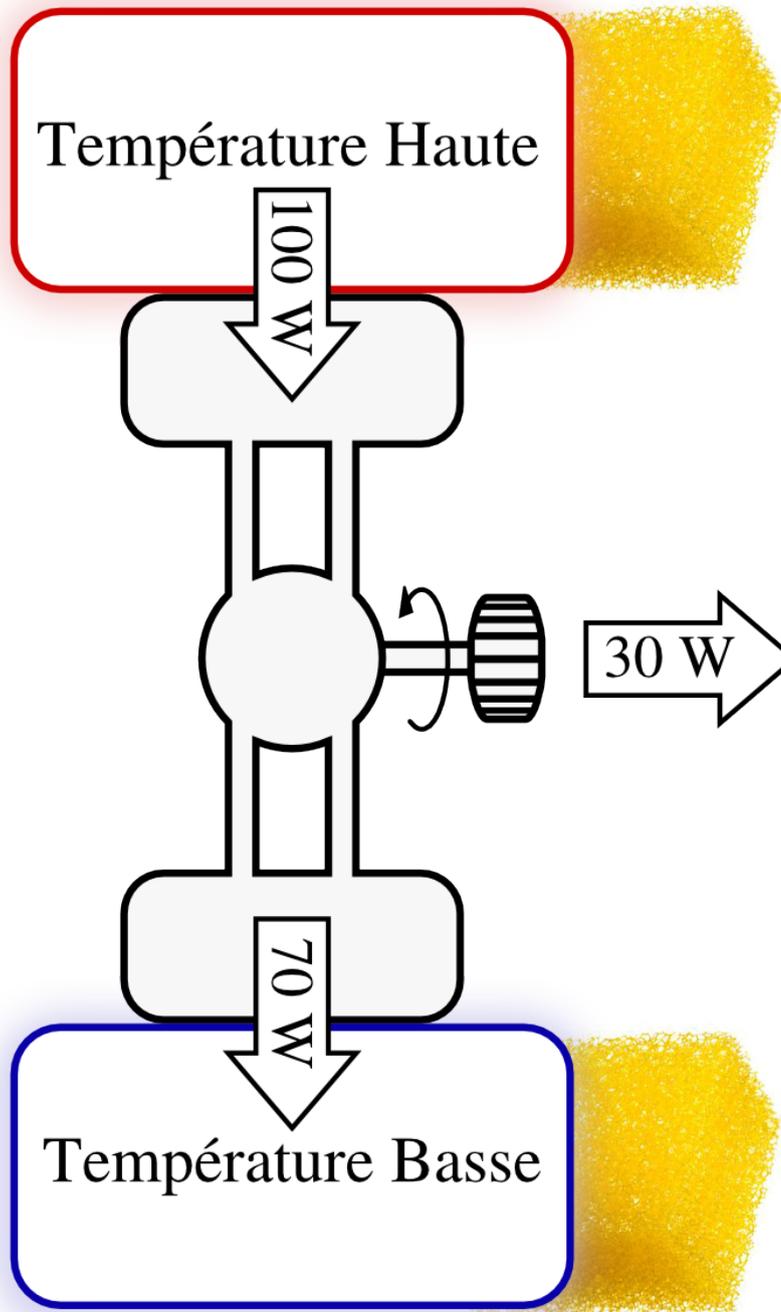
30 W



70 W

Température Basse





Newton

Watt

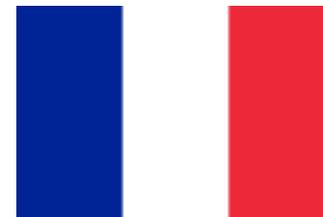
Joule



~~Mayer~~



~~Carnot~~



7.4 L'échelle de température thermodynamique

~ la thermodynamique entre dans l'absolu ~

T

l'eau qui bout,

l'eau qui gèle

le gaz parfait qui n'existe pas

La température

comme relation entre chaleur et travail

William Thomson

7.4.2 Qu'est-ce qu'une échelle en physique ?

Combien de masse ?

Combien lumineux ?

Combien de couleur ?

1

Un degré zéro

2

Un étalon

3

Une échelle

$$\frac{40\text{ }^{\circ}\text{C}}{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{80\text{ }^{\circ}\text{C}}{40\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

$$\frac{40^{\circ}\text{C}}{-10^{\circ}\text{C}} = \frac{??}{40^{\circ}\text{C}}$$

zéro : ok

zéro degré = zéro énergie interne

Fahrenheit :

32 = gel de l'eau

96 = corps humain

Fahrenheit 2.0

0 = glace + sel + eau

212 = ébullition de l'eau

Celsius :

0 = ébullition de l'eau

100 = gel de l'eau

Celsius v2

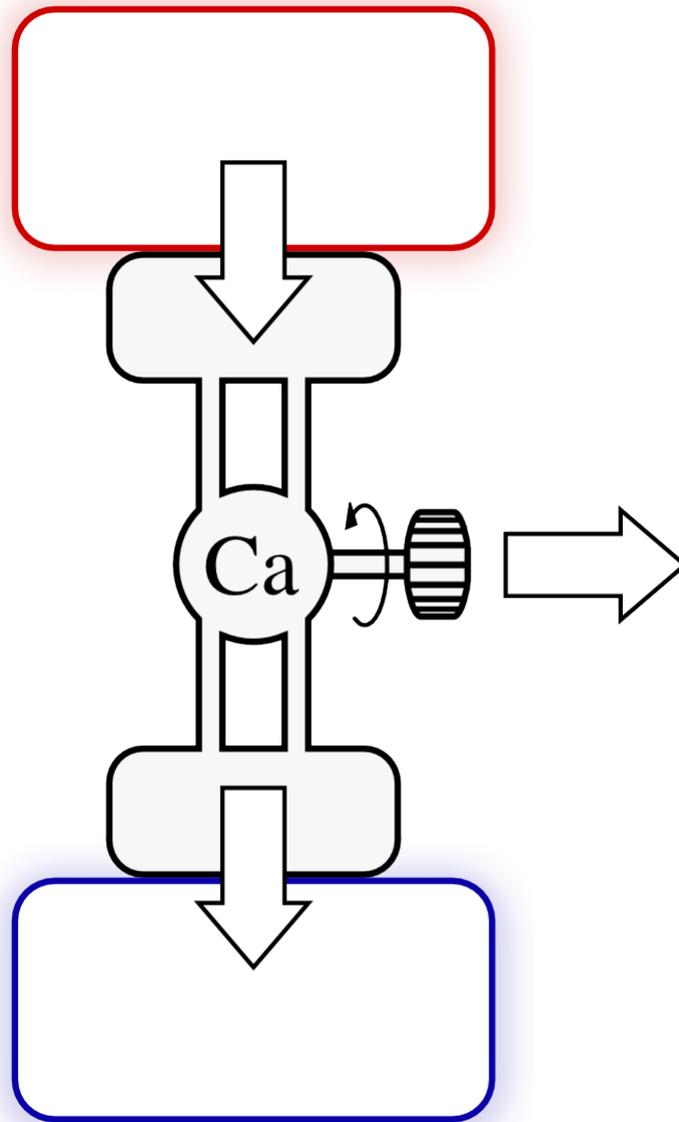
100 = ébullition de l'eau

0 = gel de l'eau

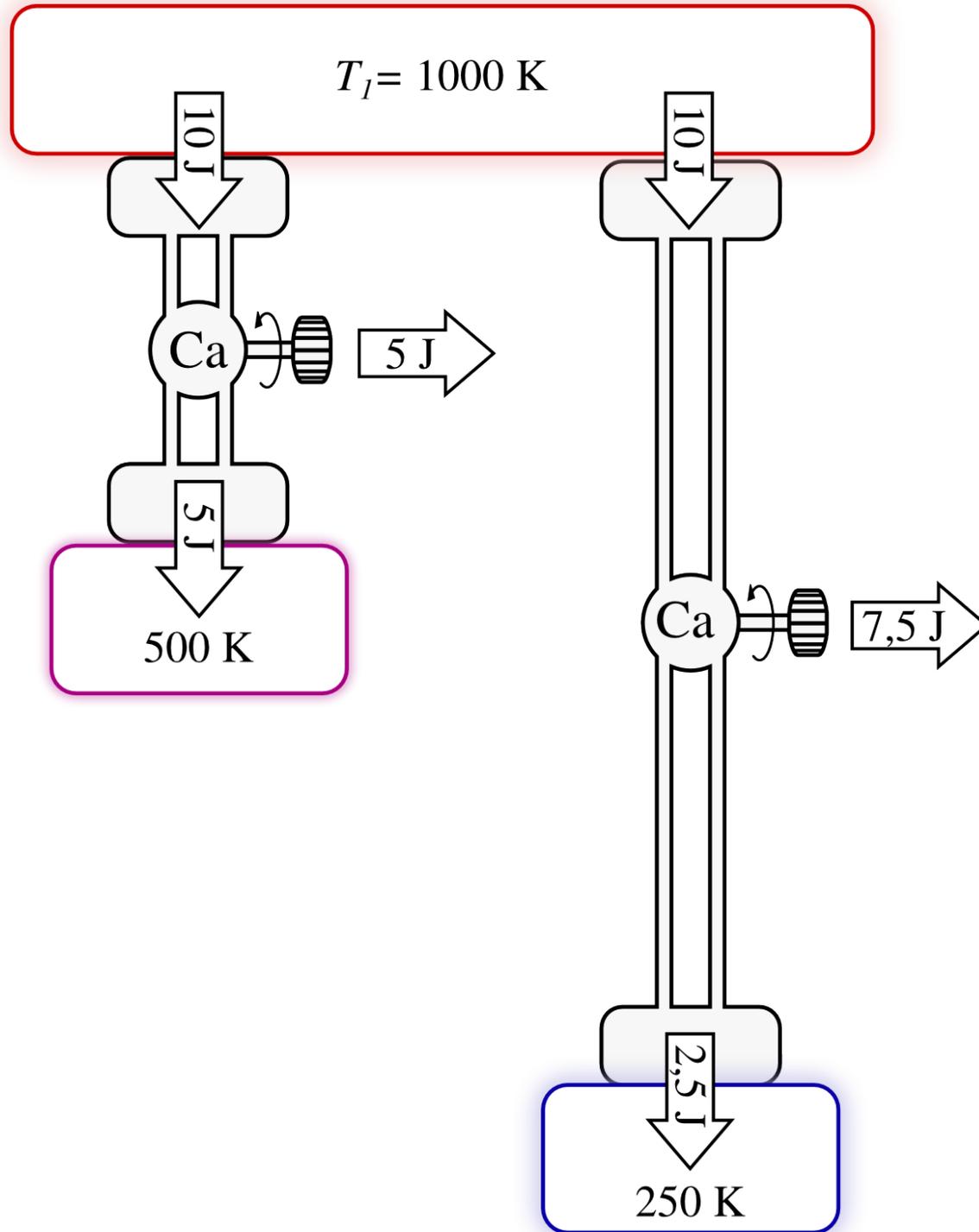
Mais, comment définir 1200°C ?

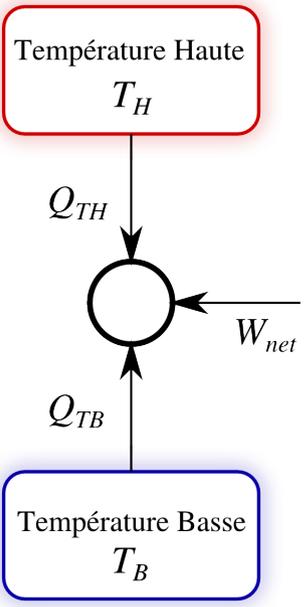
Quelle graduation a le « vrai » zéro ?

William Thomson : la machine de Carnot comme thermomètre



Le thermomètre de Thomson





$$\frac{T_H}{T_B} \equiv \left| \frac{\dot{Q}_{TH}}{\dot{Q}_{TB}} \right|$$

(7/4)

Dans une machine thermique réversible.

Soit une machine de Carnot
fonctionnant entre deux réservoirs thermiques
séparés d'**un degré de température** (1 K),
et à laquelle on fournit une quantité de chaleur de 1 Joule ;

La température de la source chaude est *définie* comme
l'inverse du travail produit.

1 – un « zéro »

2 – un étalon

3 – une échelle

Un moteur de Carnot entre 100°C et 0°C a
une efficacité de 28,8 %.

Quelles deux températures absolues
donneraient 28,8 %
et seraient espacées de 100 unités ?

$$0^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K}$$

$$4 - 0$$



William Thomson

Lord Kelvin

Newton

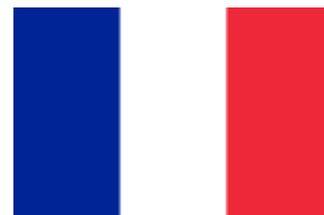
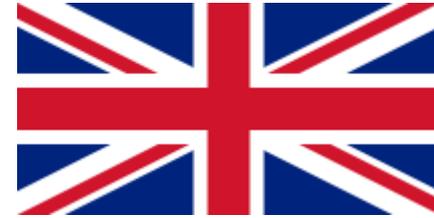
Watt

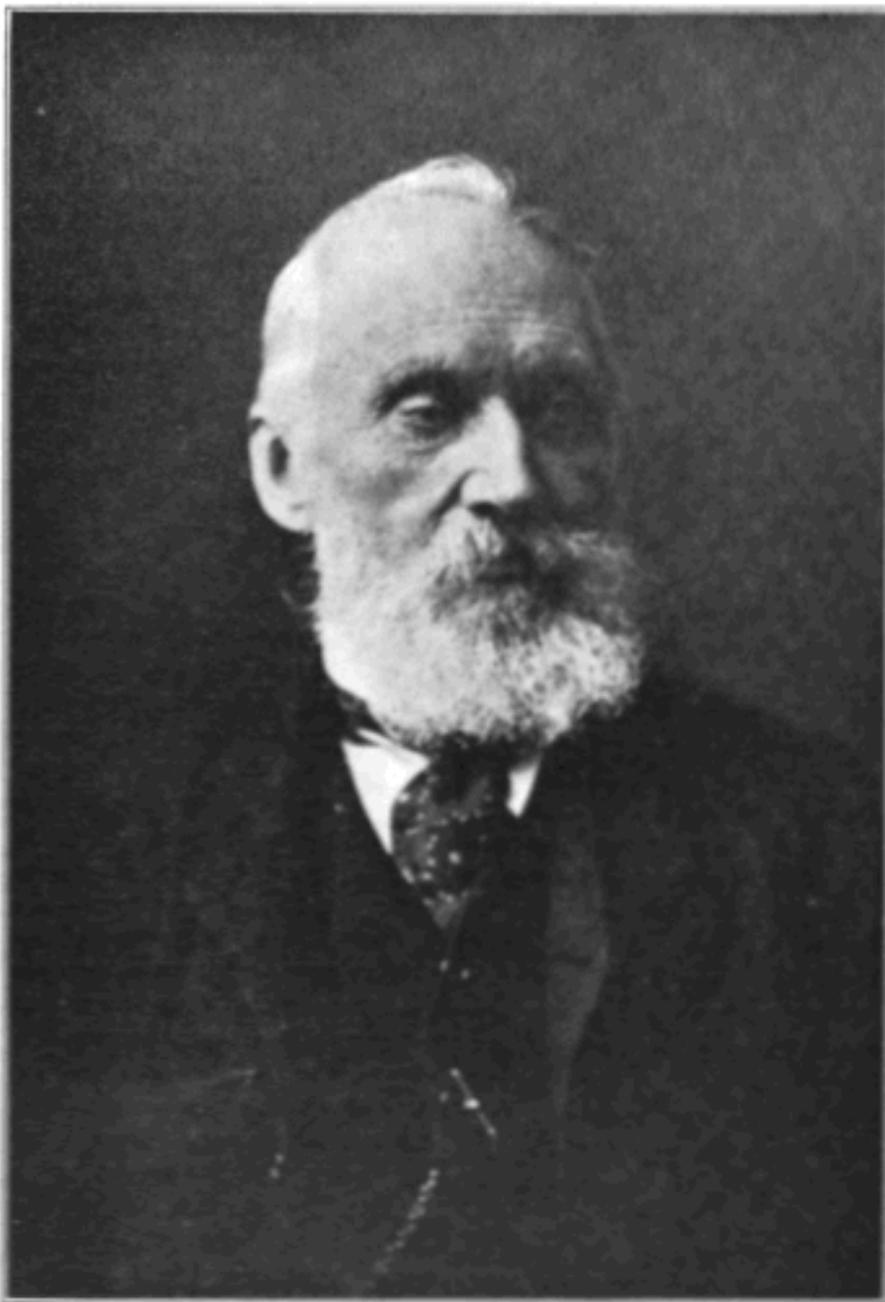
Joule

Kelvin

~~Mayer~~

~~Carnot~~





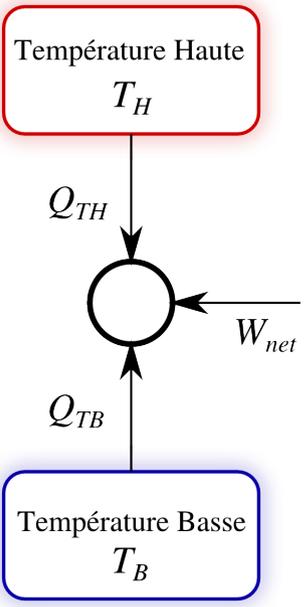
William Thomson

The Right Honourable

First Lord Kelvin

(OM, GCVO, PC, PRS, PRSE)

*Yours very truly
Kelvin*



$$\frac{T_H}{T_B} \equiv \left| \frac{\dot{Q}_{TH}}{\dot{Q}_{TB}} \right|$$

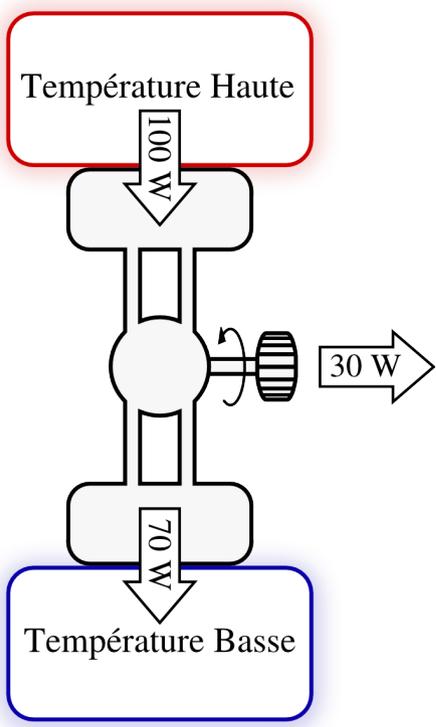
(7/4)

Dans une machine thermique réversible.

7.5 Efficacité maximale des machines

~ le français travaille mieux que les autres ~

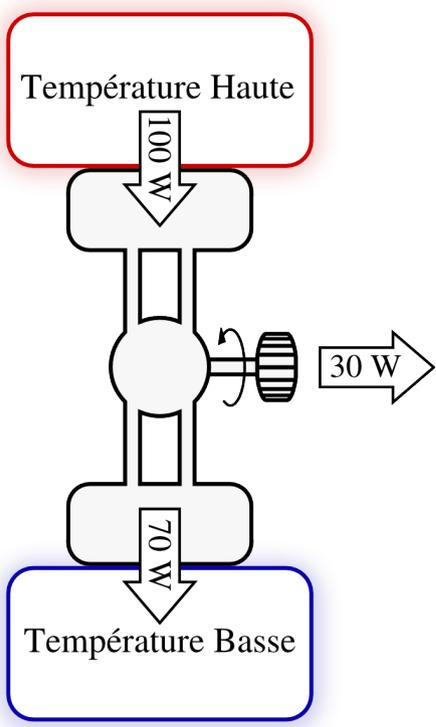
7.5.1 Efficacité du moteur de Carnot



$$\eta_{moteur} = 1 - \left| \frac{\dot{Q}_{TB}}{\dot{Q}_{TH}} \right|$$

(6/5)

pour tout moteur



$$\eta_{\text{moteur Carnot}} = 1 - \frac{T_B}{T_H}$$

(7/6)

pour un moteur réversible



Stupeur ! Stupéfaction !

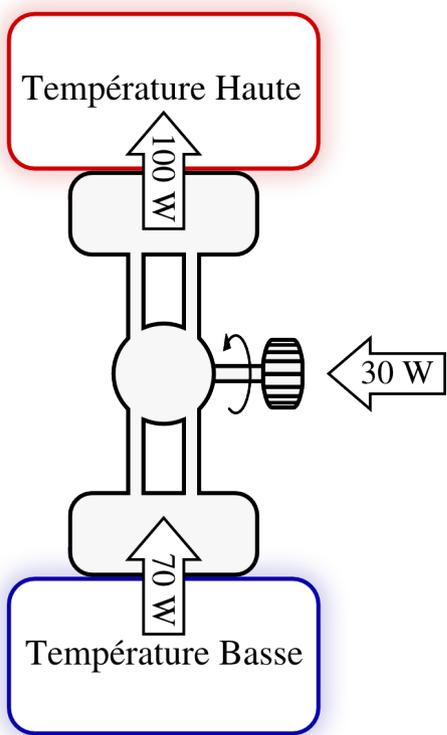
L'efficacité maximale d'un moteur ne
dépend *que* de ses températures !

(et elle est catastrophiquement mauvaise)

$$T_B = T_{\textit{Saint-Quentin}}$$

$$T_H = T_{\textit{tout-ce-que-tu-peux}}$$

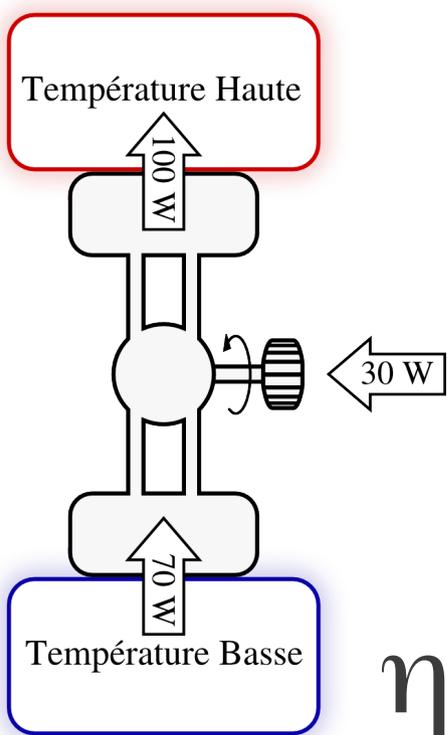
7.5.2 Efficacité du réfrigérateur de Carnot



$$\eta_{\text{réfrigérateur}} = \frac{1}{\left| \frac{\dot{Q}_{TH}}{\dot{Q}_{TB}} \right| - 1}$$

(6/7)

Pour tout réfrigérateur

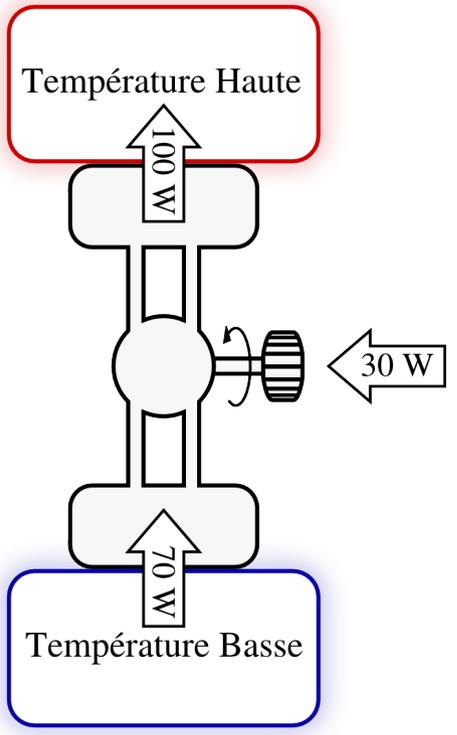


$$\eta_{\text{réfrigérateur Carnot}} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_B} - 1}$$

(7/7)

pour un réfrigérateur réversible.

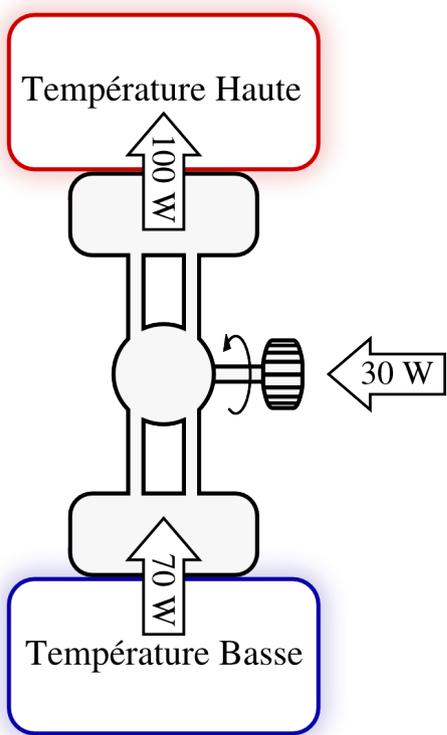
7.5.3 Efficacité de la thermopompe de Carnot



$$\eta_{thermopompe} = \frac{1}{1 - \left| \frac{\dot{Q}_{TB}}{\dot{Q}_{TH}} \right|}$$

(6/9)

pour toute pompe à chaleur



$$COP_{TP\ Carnot} = \eta_{TP\ Carnot} = \frac{1}{1 - \frac{T_B}{T_H}}$$

pour une thermopompe réversible.