Thermodynamique

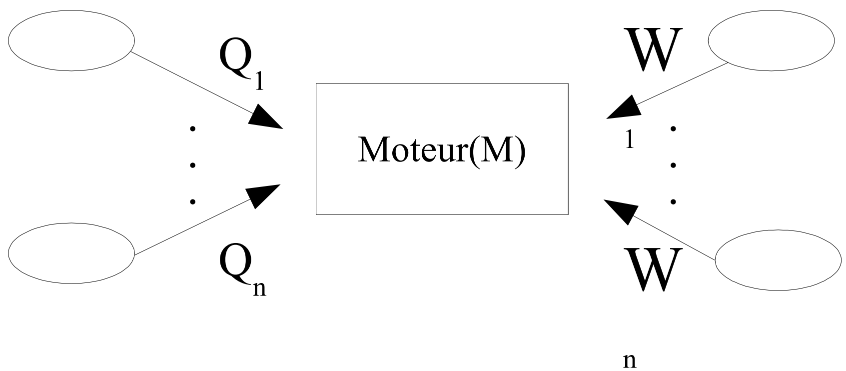
Cours 9

- **VI. Machines thermiques**

  - **Définitions. Moteurs cycliques.**
  - **Ennoncés historiques du 2ème principe.**
  - **Le cycle de Carnot. Rendement d'un moteur.**
  - **Le refrigerateur.**
  - **La pompe à chaleur.**
  - **Exemples**

Machines thermiques

Nombreux appereils peuvent être décrits par la thermodynamique : moteurs à essence et diesel, les réfrigérateurs, les pompes à claleur, les centrales électriques, les usines d'incinération...



Une machine thermique est constituée :

- D'un système (M, moteur) qui décrit un chemin thermodynamique.
- Des réservoirs de travail ou de chaleur (thermostats) en contact avec lui

Une machine thermique, comme tout autre système,
<u>doit vérifier le premier et le deuxième principe de la thermodynamique</u>

$$\Delta S_{\text{machine th}} \geq 0 \quad \text{avec} \quad \Delta S_{\text{machine th}} = \underbrace{\Delta S_{moteur}}_{S_{échangée}+S_{créée}} + \underbrace{\Delta S_{reservoirs}}_{-S_{échangée}}$$

$$\Delta S_{\text{machine th}} = S_{créée} \geq 0$$

Obtention de Travail : moteurs cycliques

Deux examples de moteurs :

Moteur d'une Porsche   Moteur d'une navette spatiale

Avec une différence fondamentale du point de vue thermodynamique...

Le travail est obtenu cycliquement   **Le travail n'est pas obtenu cycliquement**

Notre intérêt portera sur les motéurs suivant un cycle de transformations:
l'état initial et final du cycle sont les mêmes.

Premier principe (conservation de l'énergie) : **on doit fournir de la chaleur pour obtenir du travail**

Deuxième principe : (Kelvin) **Il faut au moins une deuxième source de chaleur (il y a de pertes)**

Cycle : état initial = état final $\longrightarrow$ $\Delta U_{moteur}=0 \quad \Delta S_{moteur}=0$

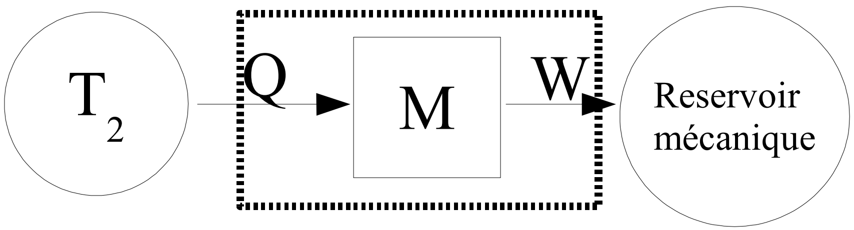
$Si\,\Delta S_{\text{machine}}=S_{créée}=0$ Cycle Réversible (parfois on écrit: $\Delta S_{cycle}=0$)

$Si\,\Delta S_{\text{machine}}=S_{créée}>0$ Cycle Irréversible (parfois on écrit: $\Delta S_{cycle}>0$)

Deuxième principe de la thermodynamique: enoncés historiques

Ennoncé de Kelvin

Le moteur monotherme n'existe pas : une machine dont le seul résultat est de transformer en travail de la chaleur prise à une source unique à la température T_2 =cte est impossible.



$$Premier\ principe : \Delta U_M = W + Q \quad (1) \quad \text{(avec W<0 et Q>0)}$$

$$Deuxième\ principe : \Delta S_M = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + \frac{Q}{T_2} \rightarrow S_{créée} = \Delta S_M - \frac{Q}{T_2} \geq 0 \overset{\overbrace{(1)}}{\rightarrow} \Delta S_M - \frac{\Delta U_M - W}{T_2} \geq 0$$

$$Donc : W \geq \Delta U_M - T \Delta S_M$$

$$Dans\ un\ cycle : \Delta U_M = 0 \ et\ \Delta S_M = 0 \quad \rightarrow W \geq 0$$

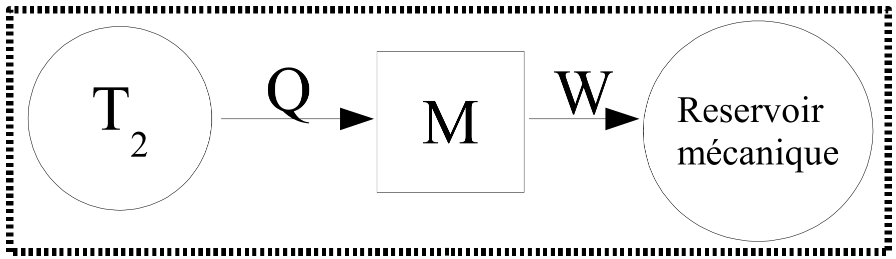
Contradiction !

Résultat contraire au 2ème principe, donc, **<u>impossible.</u>**

L'ennoncé de Kelvin montre qu'il existe une dissymétrie entre travail et chaleur

Deuxième principe de la thermodynamique: enoncés historiques
Ennoncé de Kelvin (demonstration plus simple)

Le moteur monotherme n'existe pas : une machine dont le seul résultat est de transformer en travail de la chaleur prise à une source unique à la température T_2 =cte est impossible.



Le thermostat T_2 donne Q au moteur M : son entropie diminue de Q/T_1

$$\Delta S_{Thermo} = \frac{-Q}{T_2} \quad \text{on prend } Q > 0$$

Pour le moteur:

$$\Delta S_M = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + \frac{Q}{T_2} = 0 \qquad \text{car cyclique}$$

Pour le reservoir mécanique :

$$\Delta S_{RM} = 0$$

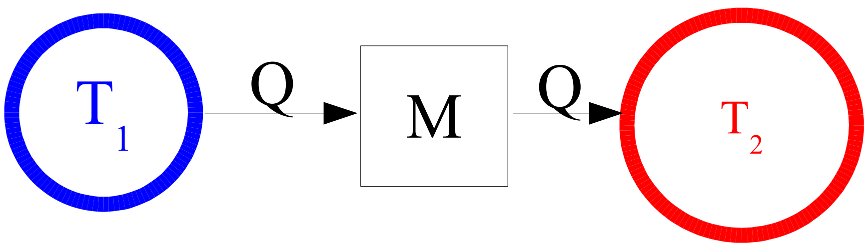
$$\Delta S_{\text{système isolé}} = \Delta S_{thermo} + \underbrace{\Delta S_M}_{0} + \underbrace{\Delta S_{RM}}_{0} = \frac{-Q}{T_2} < 0$$

Résultat contraire au 2ème principe, donc, **impossible.**

Deuxième principe de la thermodynamique: enoncés historiques

Ennoncé de Clausius

Une transformation dont le seul résultat est de transférer de la chaleru d'un corps froid vers un corps chaud est impossible.



Le thermostat T_1 donne Q au moteur M : son entropie diminue de Q/T_1

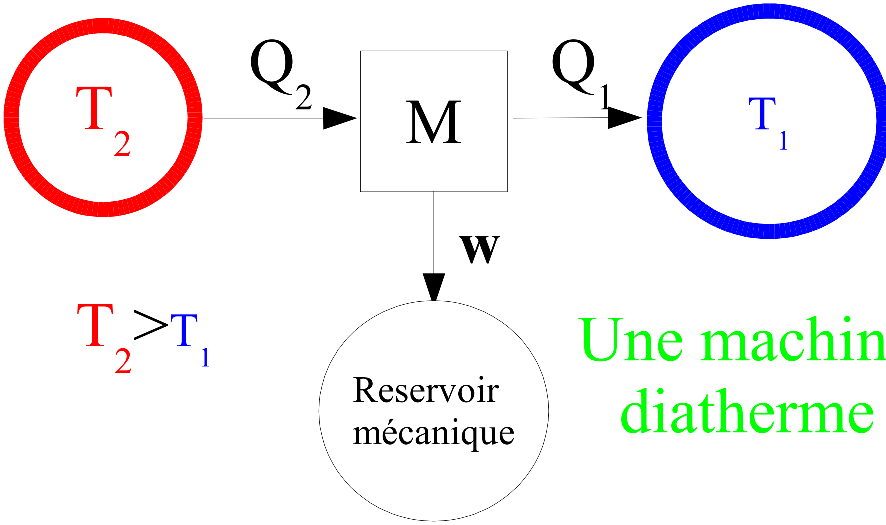
Le thermostat T_2 reçua Q du moteur M : son entropie augmente de Q/T_2

Variation totale d'entropie du système : $\Delta S = \frac{-Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2}$

Comme $T_2 > T_1 \Rightarrow \Delta S < 0$

Résultat contraire au 2ème principe, donc, **impossible.**

Proposition de Carnot (le cycle de Carnot)



Une machine diatherme

Entropie du moteur :

$$\Delta S_M = \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} + \underbrace{S_{créée}}_{\geq 0} = 0 \text{ (cycle)} \qquad \text{avec} \quad Q_2 > 0, \; Q_1 < 0$$

$$\rightarrow \quad \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} \leq 0 \text{ (Inégalité de Clausius}$$

Cycle réversible : $\Delta S = \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$

Premier principe : $W + Q_2 + Q_1 = \Delta U = 0$ (cycle)

Rendement mécanique maximum d'un moteur

$$\eta_m \equiv \left| \frac{\text{ce qui est intéressant}}{\text{ce qui coûte}} \right| = \frac{-W}{Q_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2} < 1$$

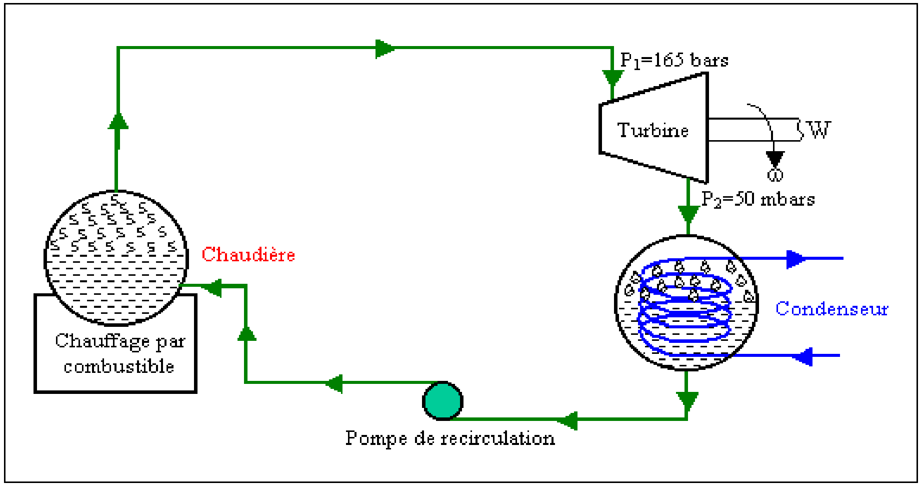
Si cycle réversible : $\frac{Q_2}{T_2} = -\frac{Q_1}{T_1} \Rightarrow \boxed{\eta_m = 1 - \frac{T_1}{T_2} \text{ (Rendement de Carnot}}$

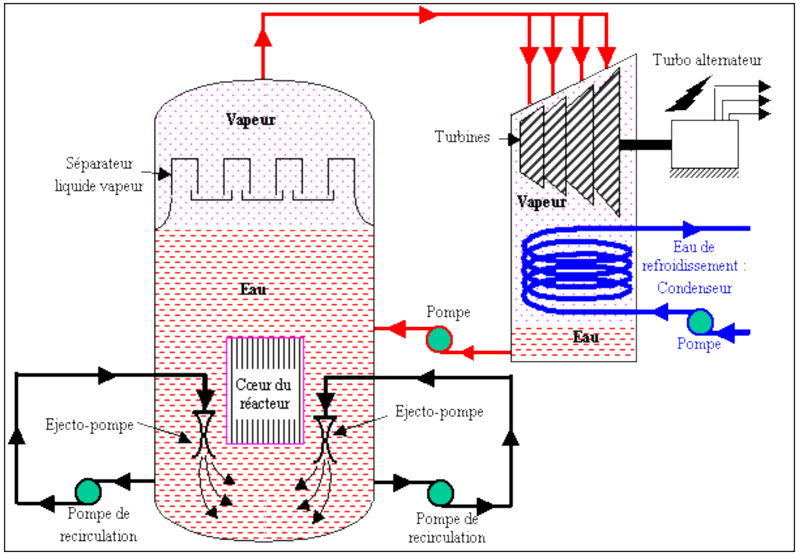
Si cycle irréversible : $S_{créée} > 0 \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} < \frac{-Q_1}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} < -\frac{-|Q_1|}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} < \frac{|Q_1|}{T_1} \Rightarrow \frac{|Q_1|}{Q_2} > \frac{T_1}{T_2}$

$$\eta_{ir} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{|Q_1|}{Q_2} < \eta_m \rightarrow \eta_{ir} < \eta_m$$

Rendement de moteurs réels

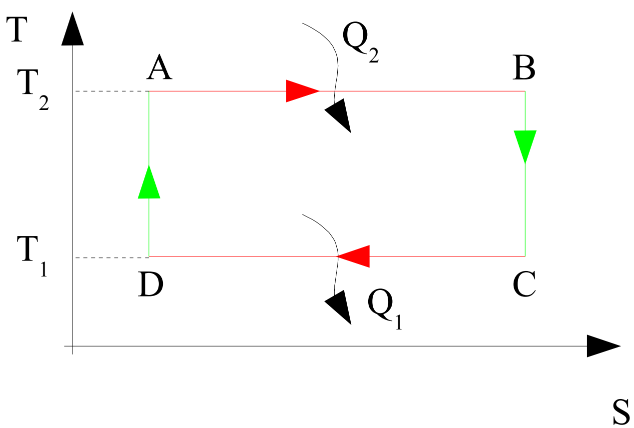
	$T_2\,(K)$	$T_1(K)$	η_m	$\eta_{réel}$
Thermiques	800	373	0.54	0.40
Nucléaires	620	373	0.40	0.32
Automobile	3270	1420	0.56	0.25





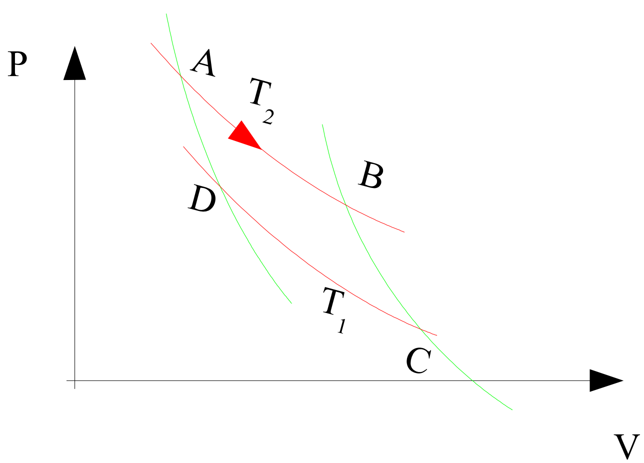
Réalisation du cycle de Carnot

- Cycle diatherme (2 thermostats)
- Agent de transformation : fluide gaz parfait
- 2 isothermes réversibles
- 2 adiabathiques réversibles
- Deux répresentations : P-V (Clapeyron) T-S (diagramme entropique)



Cycle réversible:

$$\Delta S = \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0 \qquad \text{(2ème principe)}$$



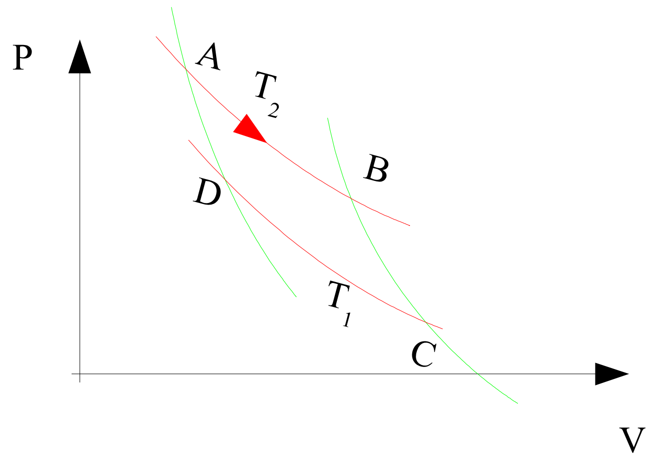
$$\Delta U_{cycle} = 0$$

$$U_A - U_A = 0 = (U_A - U_D) + (U_D - U_C) + (U_C - U_B) + (U_B - U_A)$$

$$U_i - U_j = Q_{j \to i} + W_{j \to i}$$

$$Q_{A \to B} + Q_{C \to D} + \underbrace{\sum W_{i \to j}}_{W} = 0$$

$$Q_2 + Q_1 + W = 0$$



$$Q_2 = Q_{A\to B} = -W_{A\to B} = -\int_A^B -PdV$$

$$avec \quad P = \frac{nRT_2}{V} \;\rightarrow\; Q_2 = nRT_2 \ln\frac{V_B}{V_A} > 0$$

$$également \quad Q_1 = nRT_1 \ln\frac{V_D}{V_C} < 0$$

$$\begin{array}{l} T_2 > T_1 \\ \dfrac{Q_2}{T_2} = \dfrac{-Q_1}{T_1} \end{array} \;\rightarrow\; |Q_2| > |Q_1| \;\rightarrow\; \begin{array}{l} Q_1 + Q_2 > 0 \\ W + Q_1 + Q_2 = 0 \end{array} \;\rightarrow W < 0$$

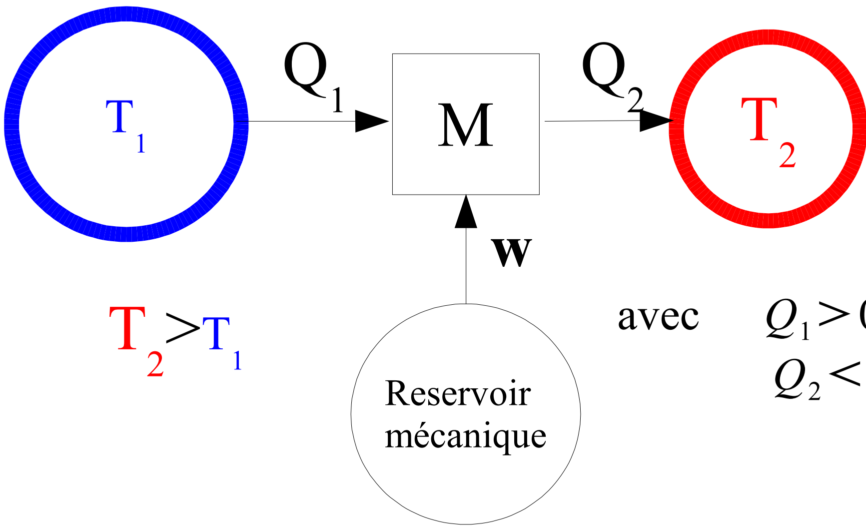
La machine fourni un travail

Le sens de parcours du cycle est important

- Sens *horaire* : W < 0 : la machine produit un travail
- Sens *antihoraire* : W > 0 : la machine consomme un travail

Si cycle réversible : $\dfrac{Q_2}{T_2} = -\dfrac{Q_1}{T_1} \;\Rightarrow\; \boxed{\eta_m = 1 - \dfrac{T_1}{T_2} \quad \text{(Rendement de Carnot}}$

Autres machines thermiques diathermes : le réfrigérateur



$T_2 > T_1$

avec $Q_1 > 0$

$Q_2 < 0$

Cycle réversible : $\Delta S = \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$

Premier principe : $W + Q_2 + Q_1 = \Delta U = 0$ (cycle)

Efficacité
(plutot que rendement)

$$\eta_m \equiv \left| \frac{\text{ce qui est intéressant}}{\text{ce qui coûte}} \right| = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{-Q_1 - Q_2} = \frac{Q_1}{-Q_1 + Q_1 \frac{T_2}{T_1}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

Si cycle réversible : $\eta_m = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$

Exemple :

$T_1 = (273 + 4)K$

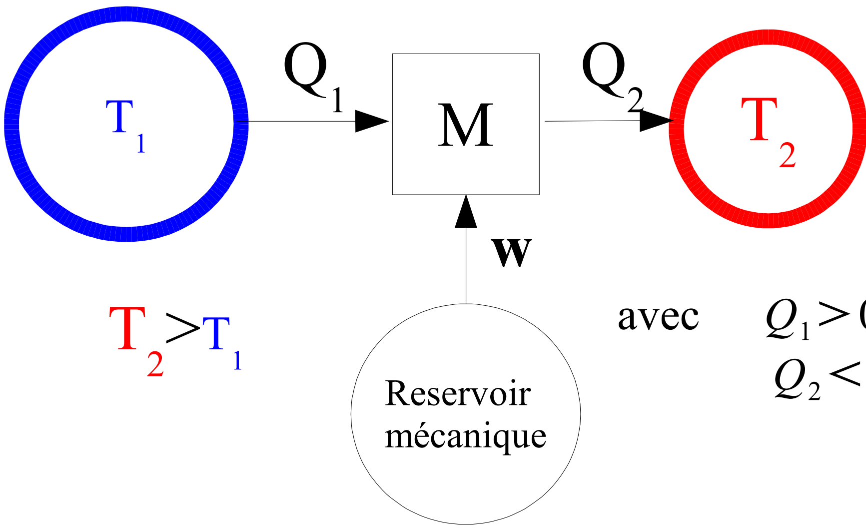
$T_2 = (273 + 20)K$

$\eta_m = \frac{277}{16} \sim 17$

Il suffit de fournir un travail de 10 J
pour extraire 170 J de chaleur du corps froid

Pour les systèmes réels (irréversibles) : $\eta \sim \frac{\eta_m}{2}$

Autres machines thermiques diathermes : la pompe à chaleur



avec $Q_1 > 0$
$Q_2 < 0$

Même principe que le réfrigérateur mais avec un but différent : *prendre de la chaleur d'une source froide et la transmettre à une source chaude*

Cycle réversible : $\Delta S = \dfrac{Q_2}{T_2} + \dfrac{Q_1}{T_1} = 0$

Premier principe : $W + Q_2 + Q_1 = \Delta U = 0$ (cycle)

Efficacité
(plutot que rendement)

$$\eta_m \equiv \left| \frac{\text{ce qui est intéressant}}{\text{ce qui coûte}} \right| = \frac{-Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

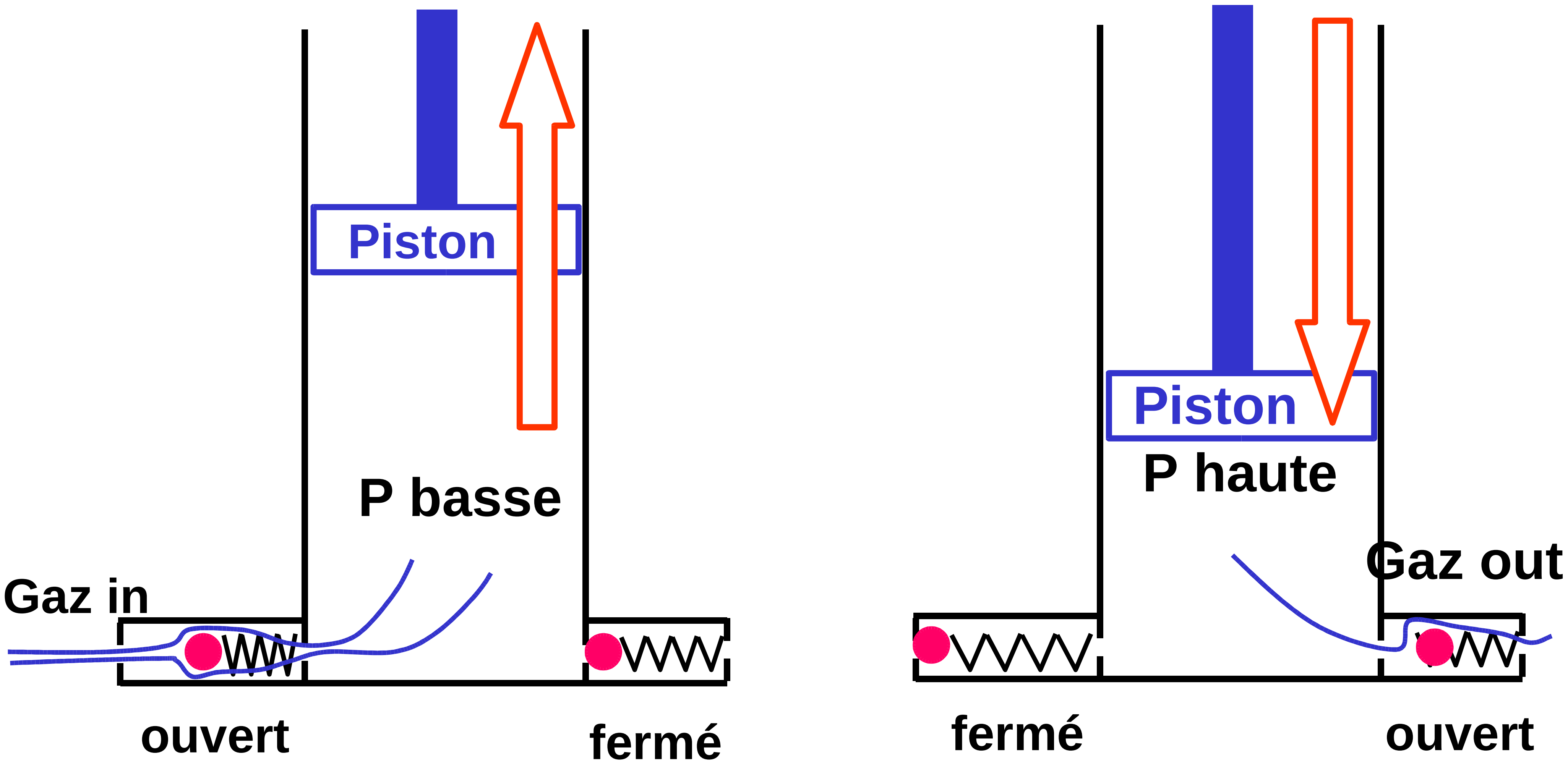
Exemple :

$T_1 = (273 + 4)\,K$ (température d'un lac)
$T_2 = (273 + 20)\,K$ (Itempérature d'une maison

$$\eta_m = \frac{293}{16} \sim 18$$

Très efficace mais les installations ont un coût initial important

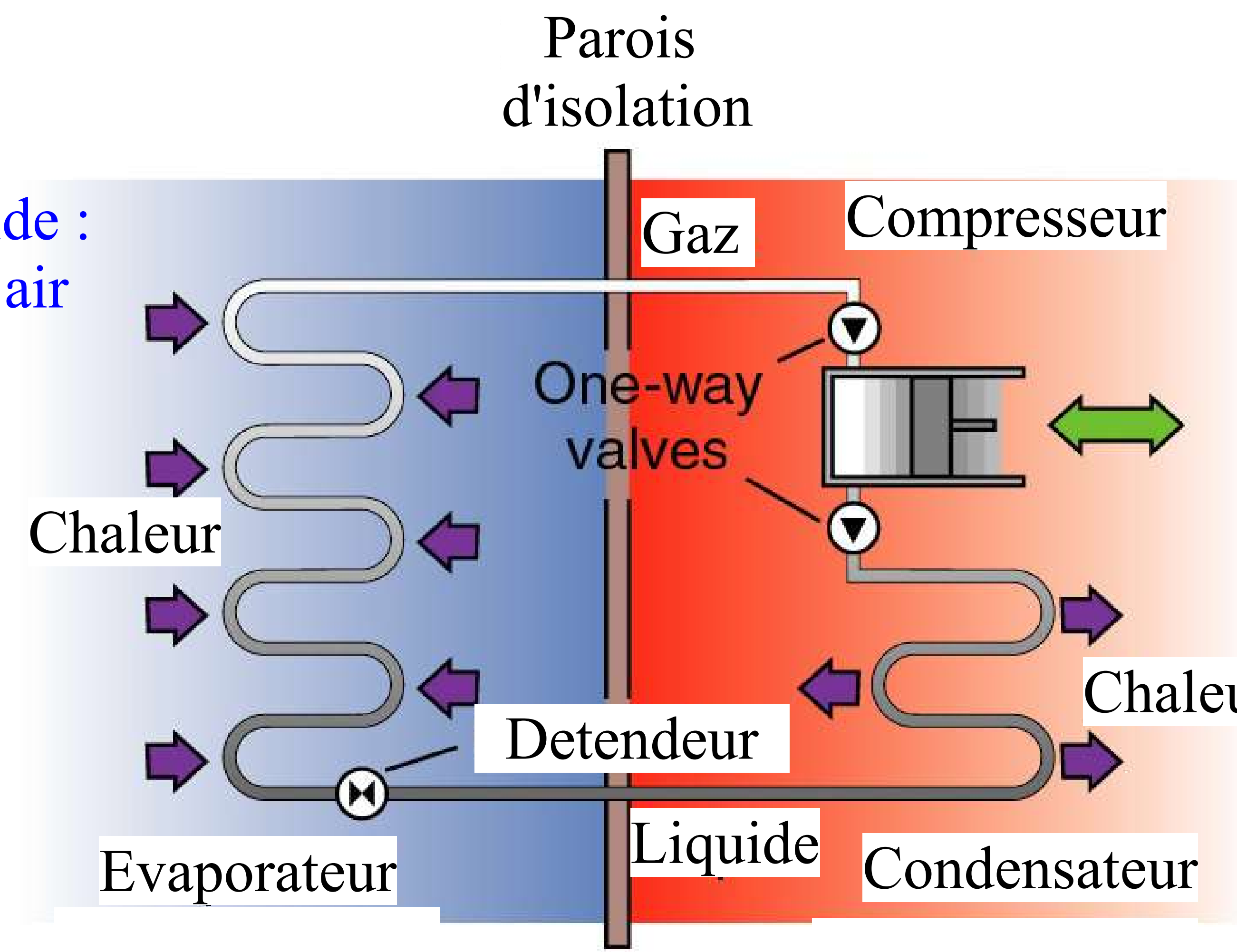
Fonctionnement d'une pompe



Refrigerateur : comment ça marche ?

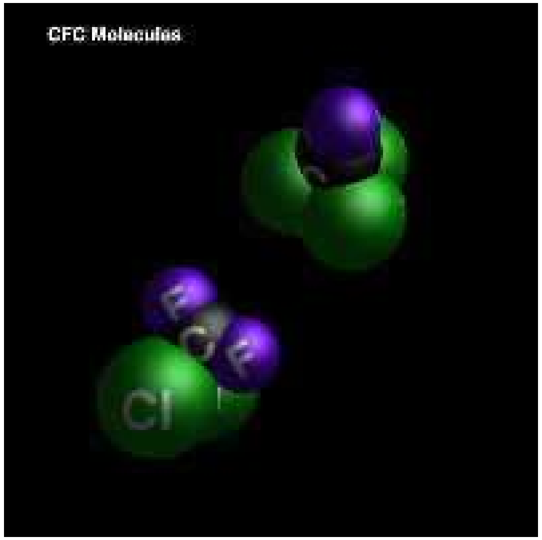
Source froide :
denrées + air

Source chaude :
air exterieur



Système à condensation avec fluide caloporteur

Fluides caloporteurs



Caractéristiques d'un bon fluide refrigérant :

- Points de fusion et ébullition bas
- Pas de toxicité, non inflammable, pas de reactivité

CFC : chlorofluorocarbones
(example :dichlorodifluoromethane CCl_2F_2)

Evolution historique :

-Amoniac

-CFC(Migdley, 1928)
aussi connus comme *fréons*.

-HCFC(decompose plus vite)

- nouvelles recherches...

Le problème du CFC :

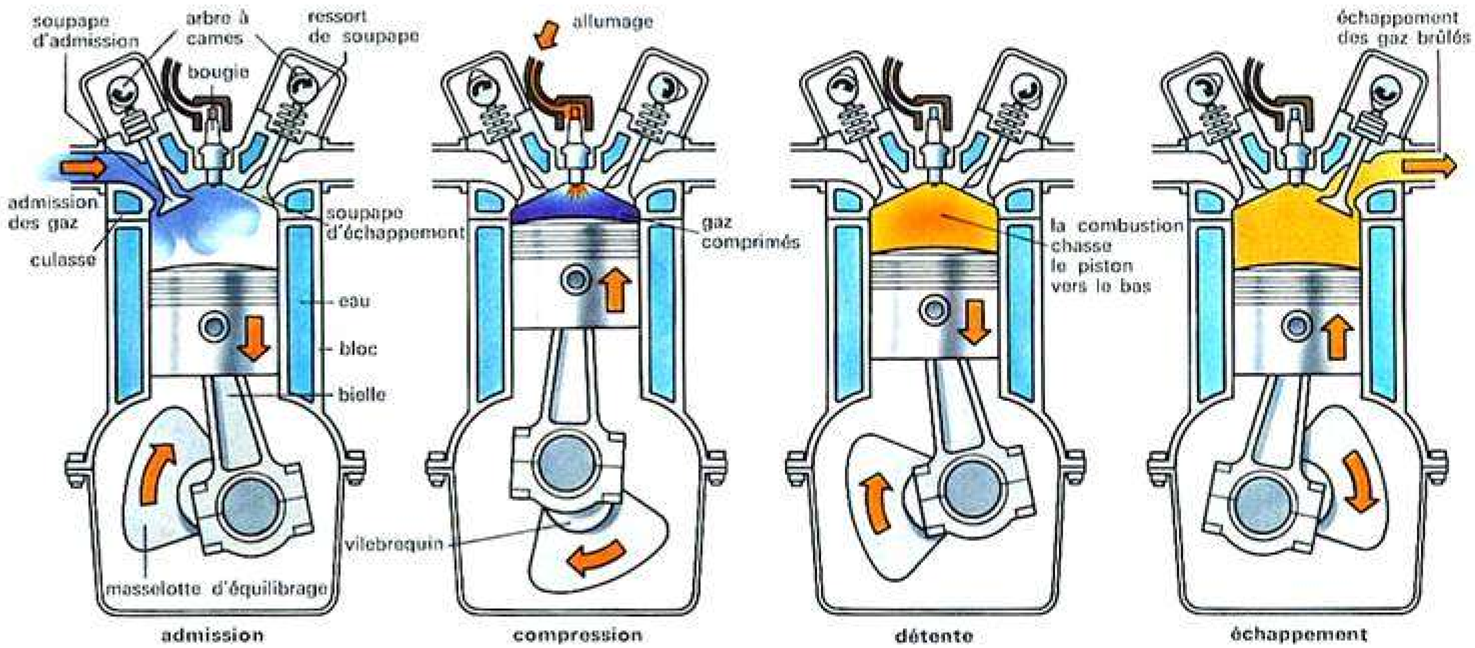
1) Peu réactif : il survit jusqu'à son arrivée à la stratosphère.

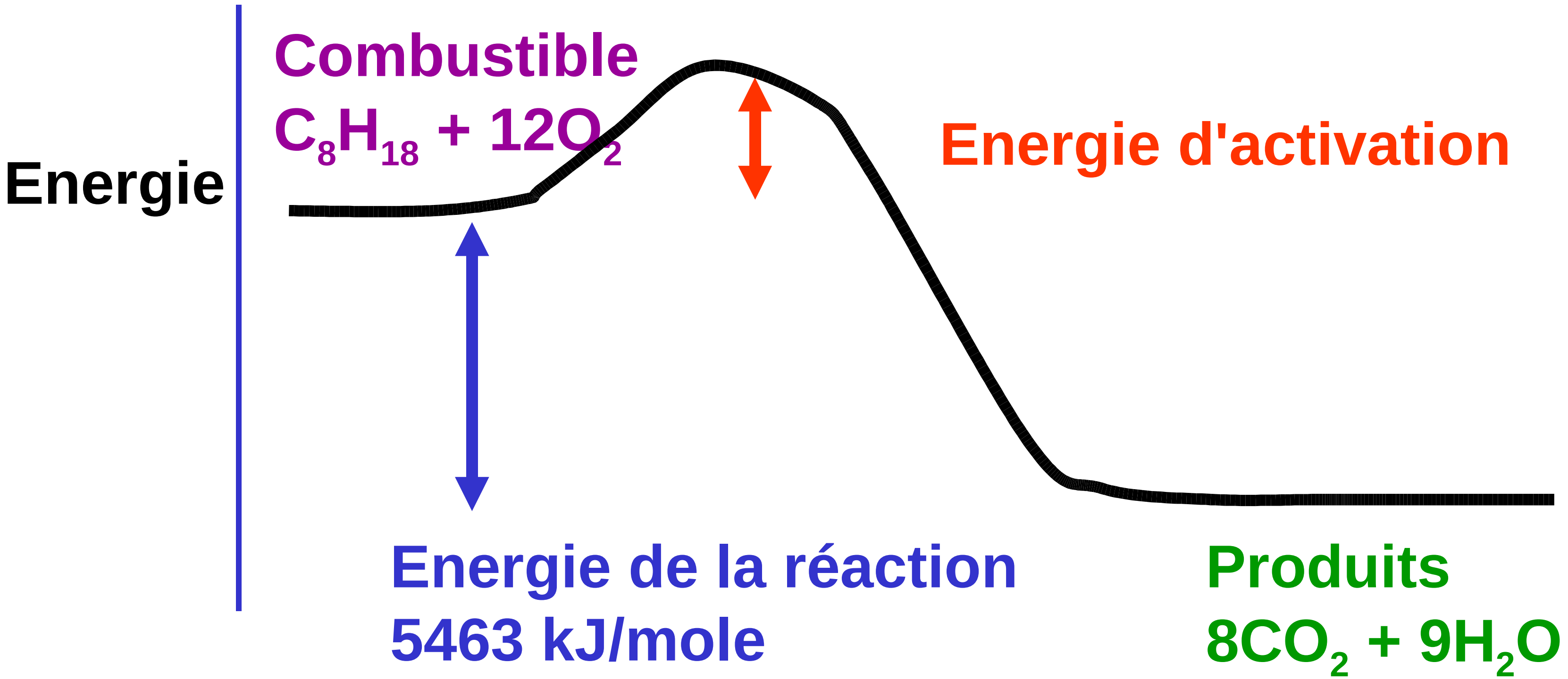
2) Decomposé par les UV

3) Réaction de desctruction de l'ozone autocatalisée :

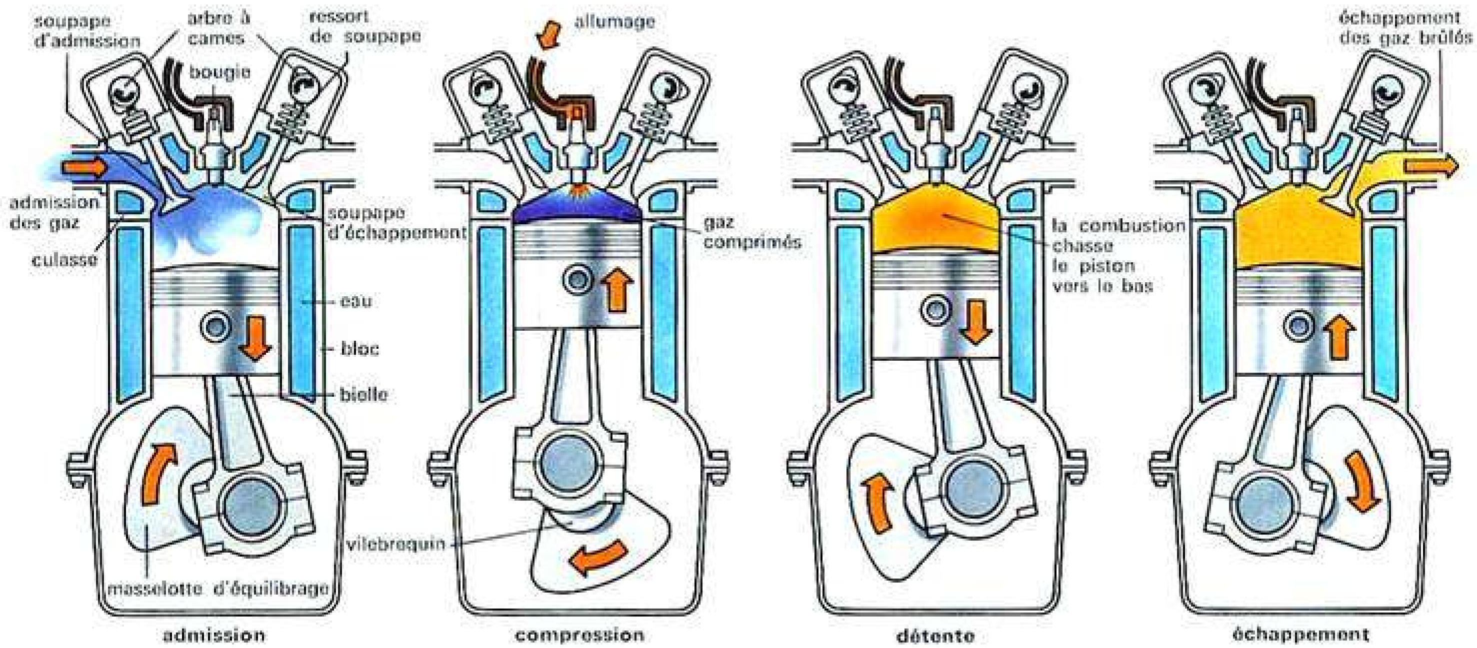
$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$$

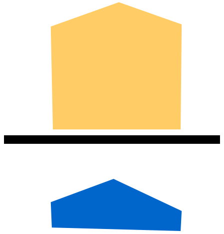
Moteur 4-temps





Moteur essence





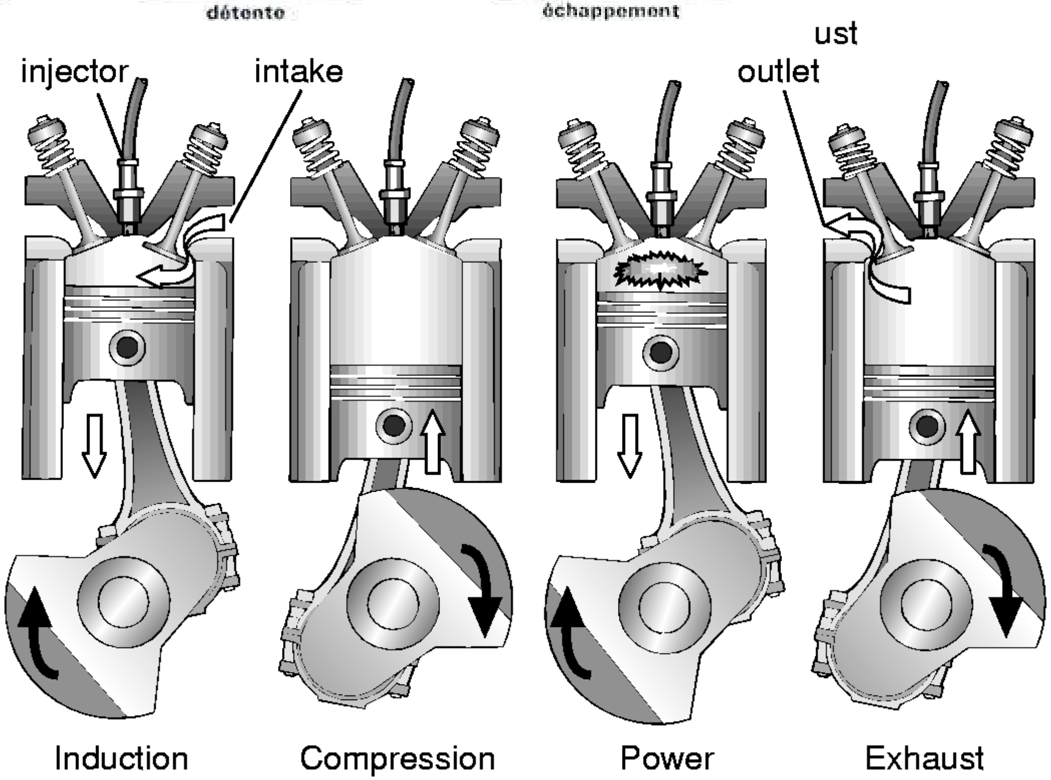
=15

Rapport de compression

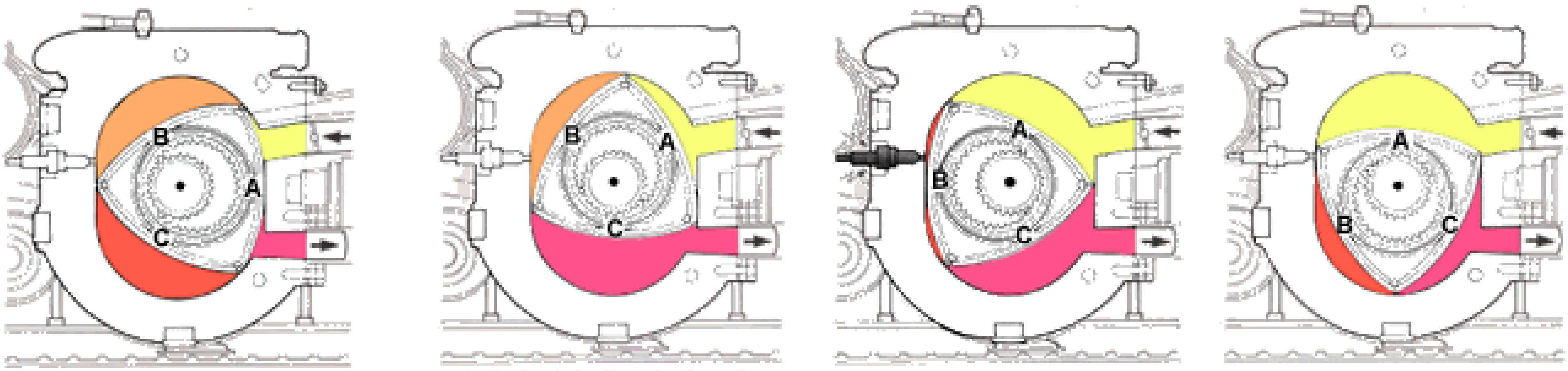
Moteur Diesel

Pas de bougie !!

La combustion du carburant
injecté dans l'air
à haute pression est spontanée



Moteur rotatif Wankel



Admission

Compression

Explosion

Echappement

• Transformation directe en mouvement rotatif :
moins de pièces, plus lèger, montée en régime plus rapide

• Desavantage majeure : plus de consommation.

Fin