

# THERMO 5

## MACHINES THERMIQUES

Objectif :

Mettre à profit les échanges de chaleur pour réaliser des conversions d'énergie entre des sources idéales de température et des sources de travail.

I PRINCIPE GÉNÉRAL

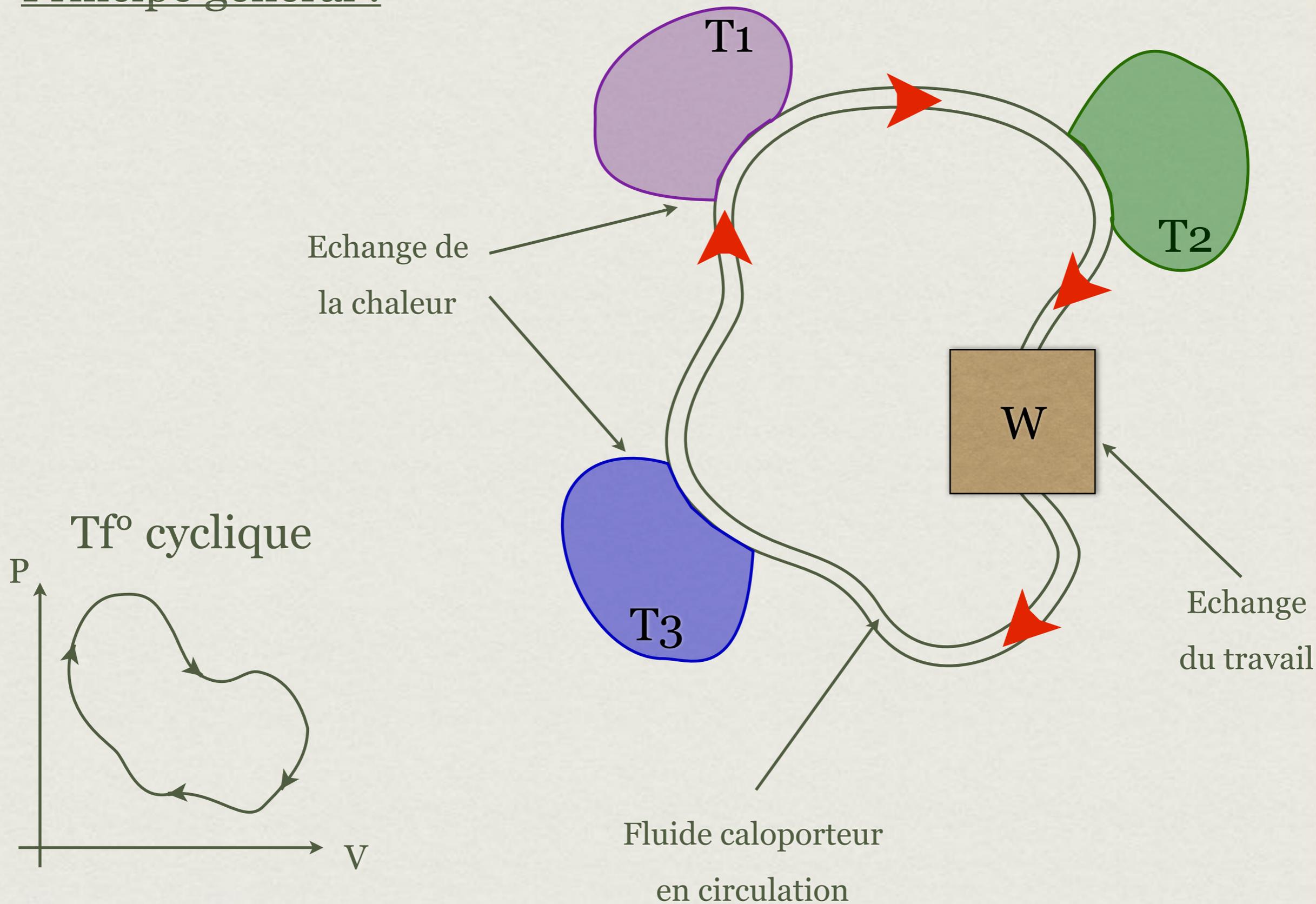
II MACHINES THERMIQUES DITHERMES

III LES CYCLES MOTEURS

# I PRINCIPE GÉNÉRAL

- Le cycle monotherme
- Principe de Clausius

# Principe général :



## Principe général :

On utilise un système fluide qui va décrire un cycle, au cours duquel il échange du travail et de la chaleur :

Ex : fréon -> réfrigérateur

récepteur :  $W > 0$

Eau -> machine à vapeur

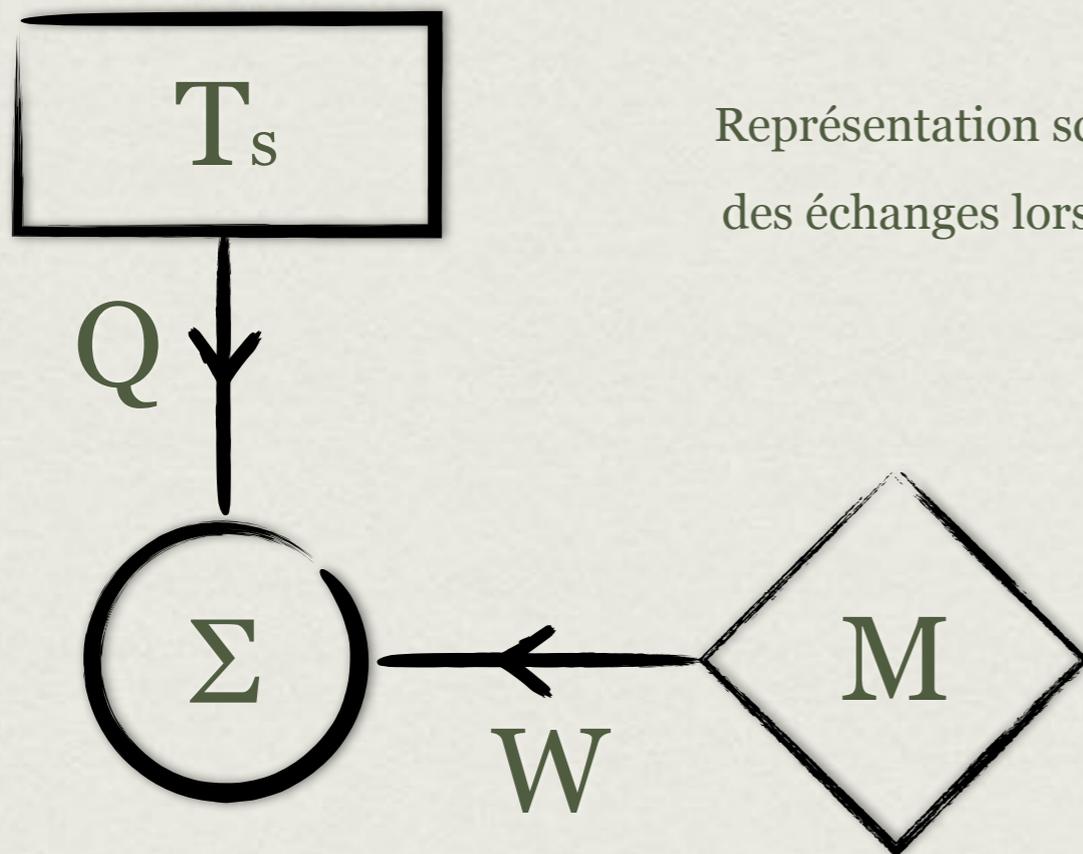
mélange air-essence -> moteur à explosion

Moteur :  $W < 0$

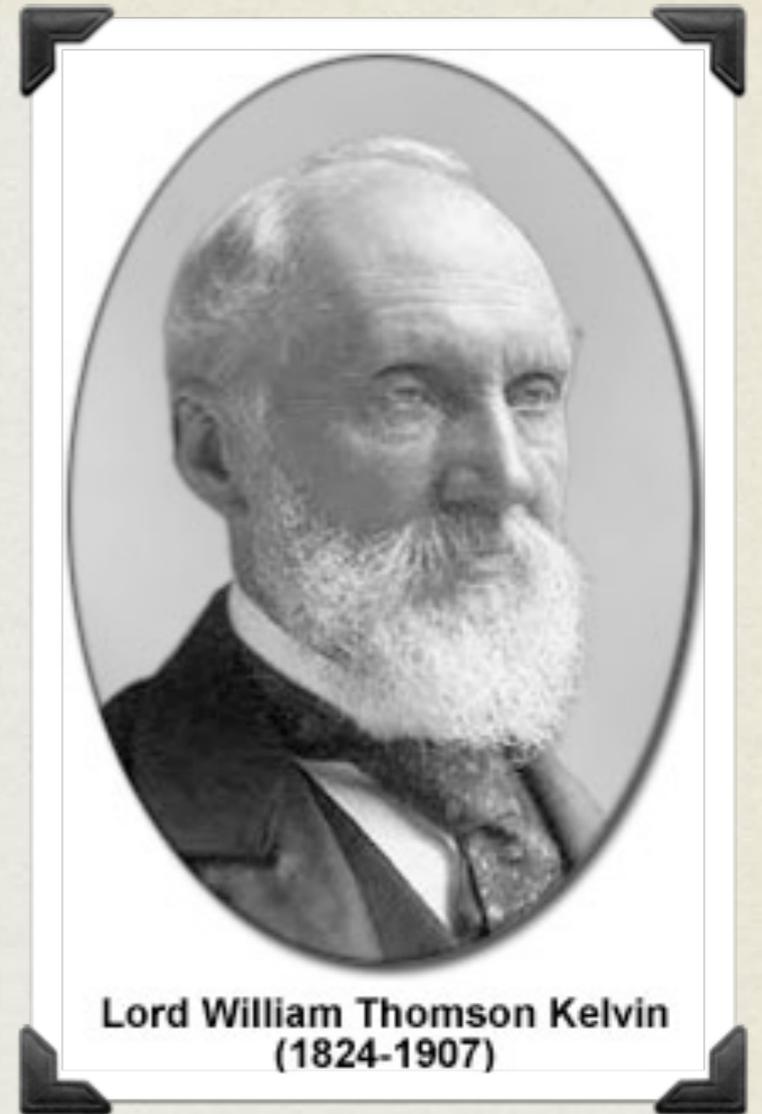
Dans la plupart des cas on met à profit des changements d'états

Cf Thermo 6

- 1 -Le cycle monotherme



Représentation schématique  
des échanges lors d'un cycle



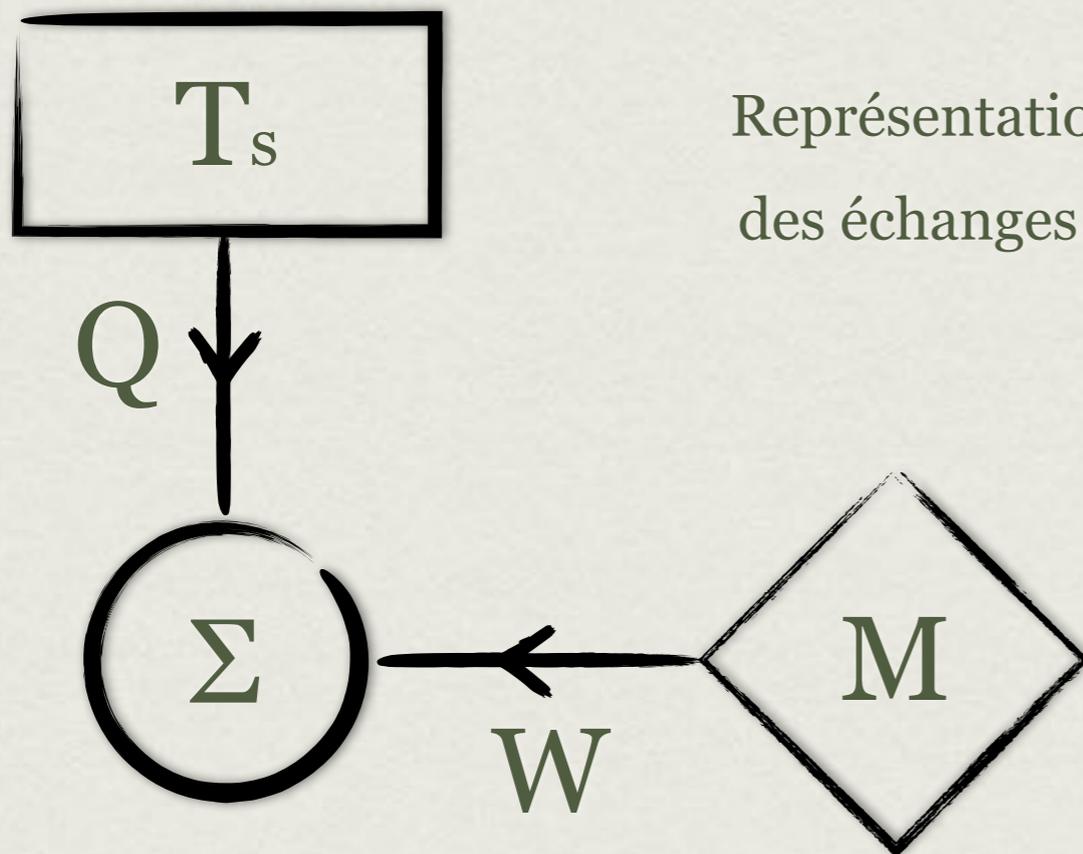
Lord William Thomson Kelvin  
(1824-1907)

— en classe —

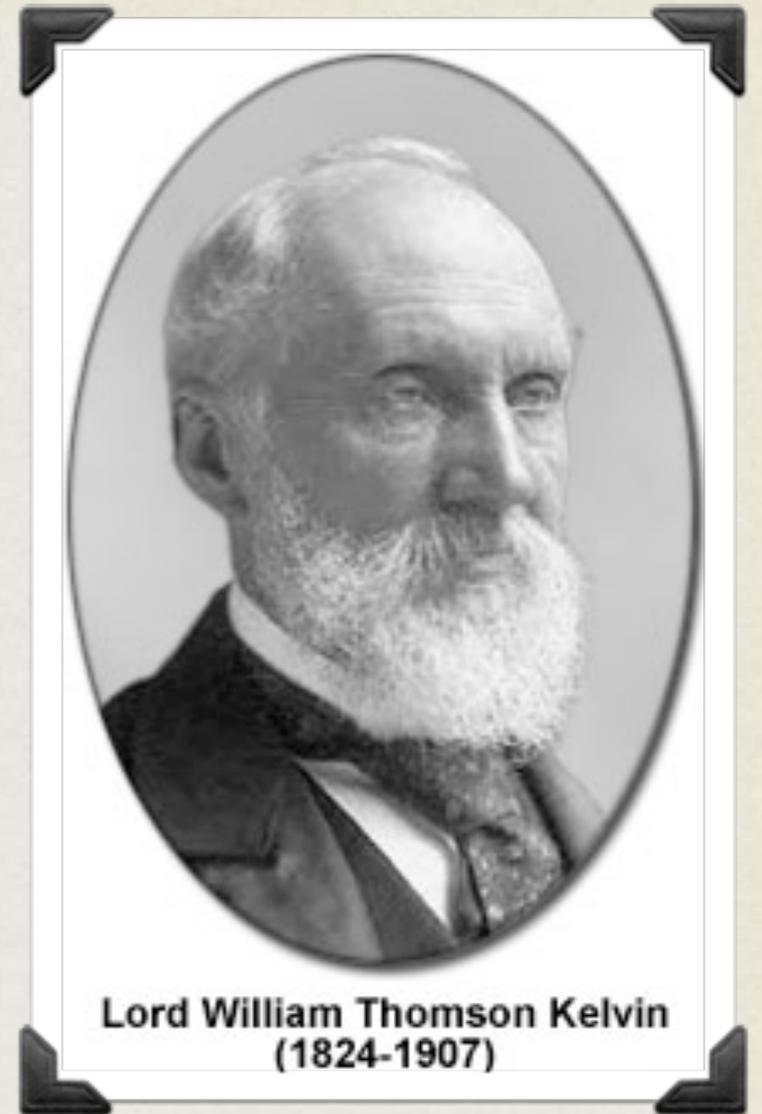
1er / 2nd Principe sur cycle  $\Rightarrow \Delta U = 0 \quad \Delta S = 0$

Calculer  $S_e$  et  $S_c > 0$  : Montrer Que  $Q_e < 0$  et  $W > 0$

- 1 -Le cycle monotherme



Représentation schématique  
des échanges lors d'un cycle



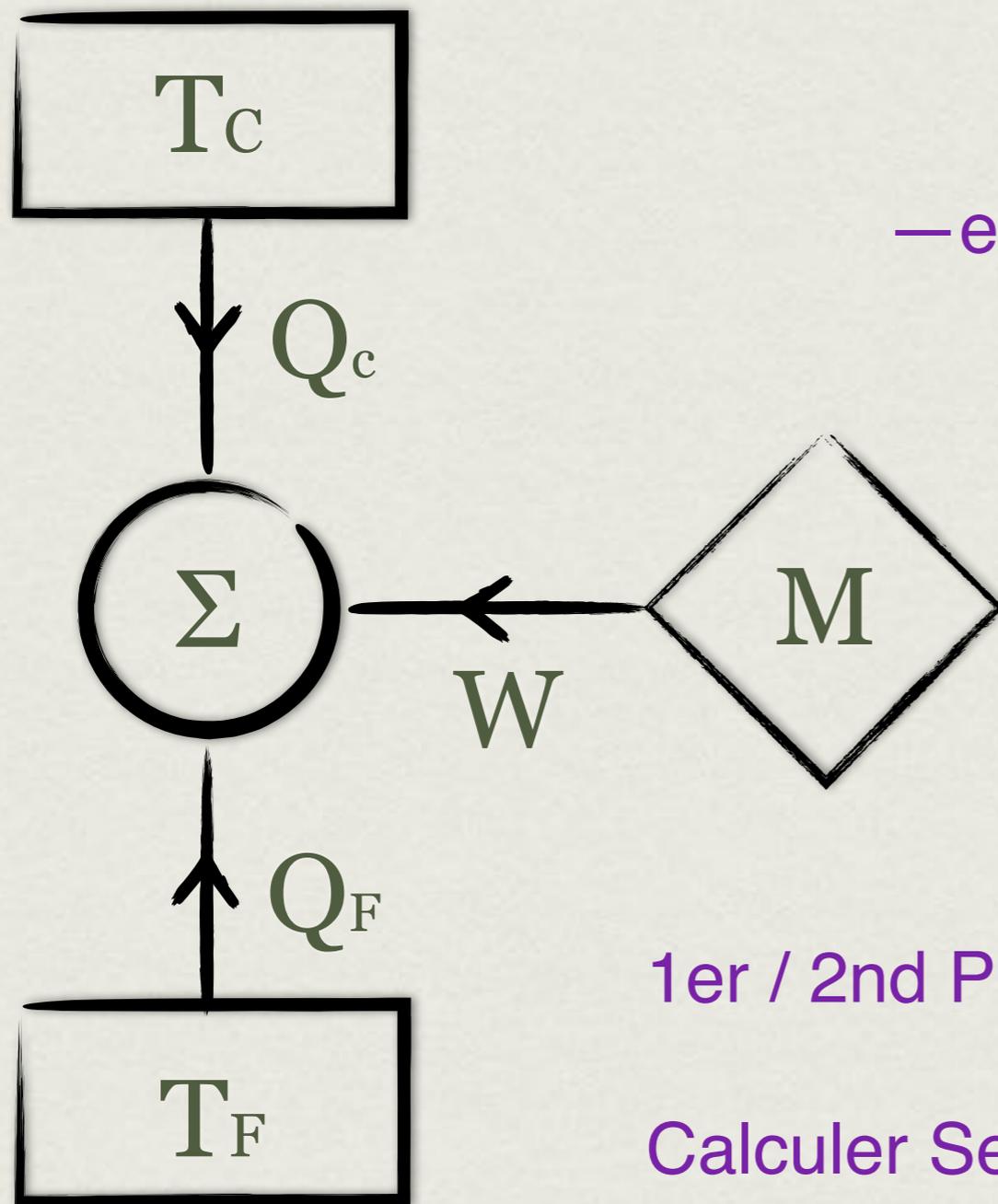
Lord William Thomson Kelvin  
(1824-1907)

2nd principe selon Thomson 1852 :

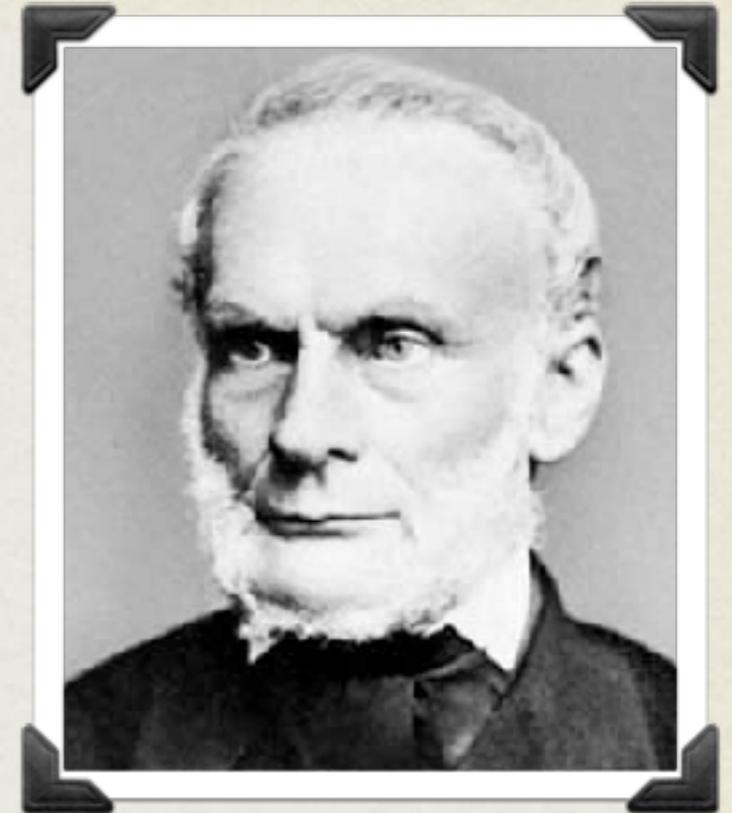
Un système décrivant un cycle monotherme ne peut que recevoir du travail et fournir de la chaleur

→ Il faut une deuxième source de chaleur pour guider les échanges de chaleur.

- 2 -Principe de Clausius



— en classe —



R.J.E Clausius (1822 - 1888)

1er / 2nd Principe sur cycle  $\Rightarrow \Delta U = 0 \quad \Delta S = 0$

Calculer  $S_e$  et  $S_c > 0$

Montrer Que :

Représentation schématique  
des échanges lors d'un cycle

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0$$

Cas particulier :  $W = 0$

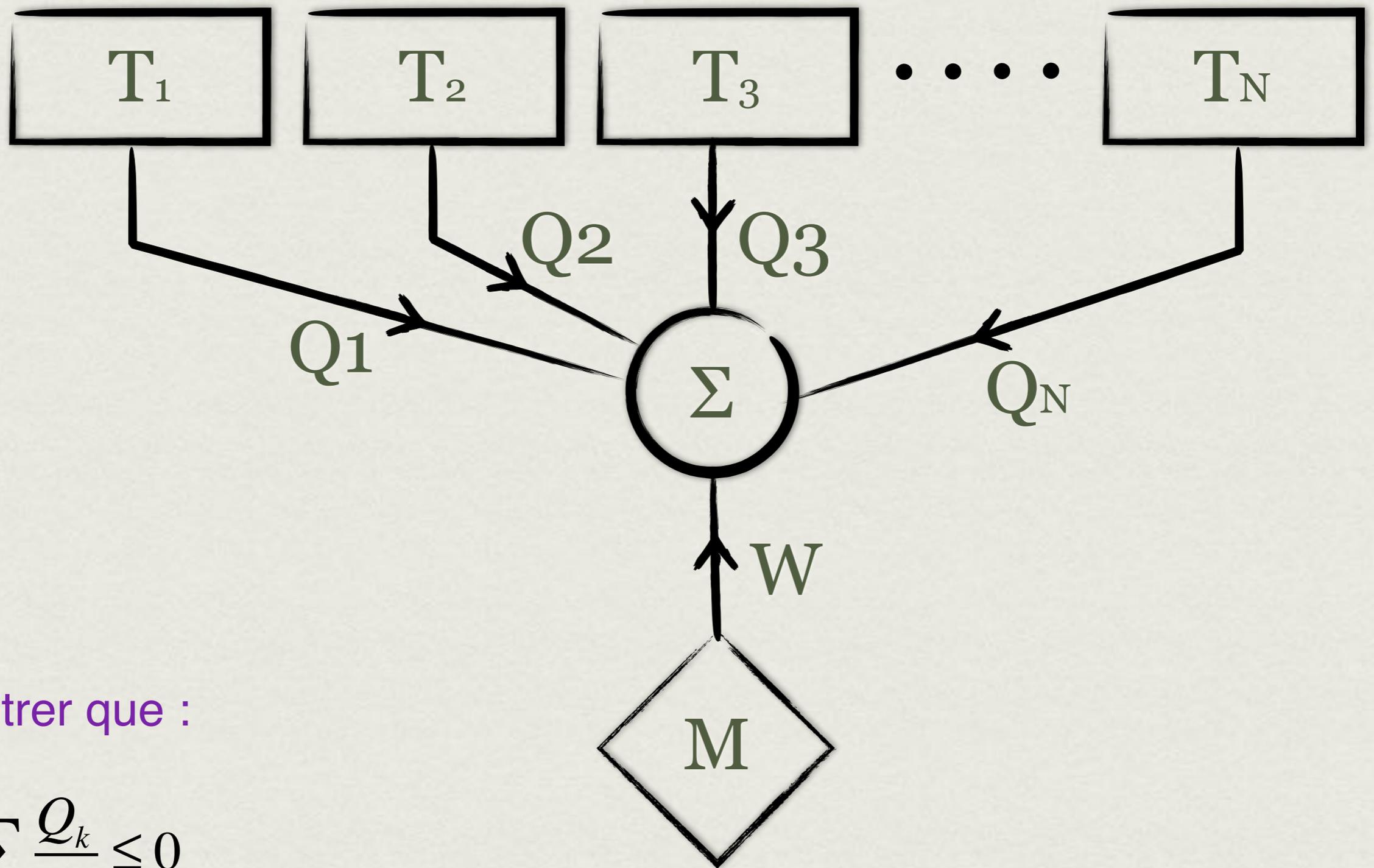
Relier  $Q_c$ ,  $T_f$  et  $T_c$  par une inégalité :

En déduire le sens naturel des échanges de chaleur.

Principe de Clausius :

La chaleur ne passe pas spontanément d'un corps froid vers un corps chaud.

Généralisation à N sources :

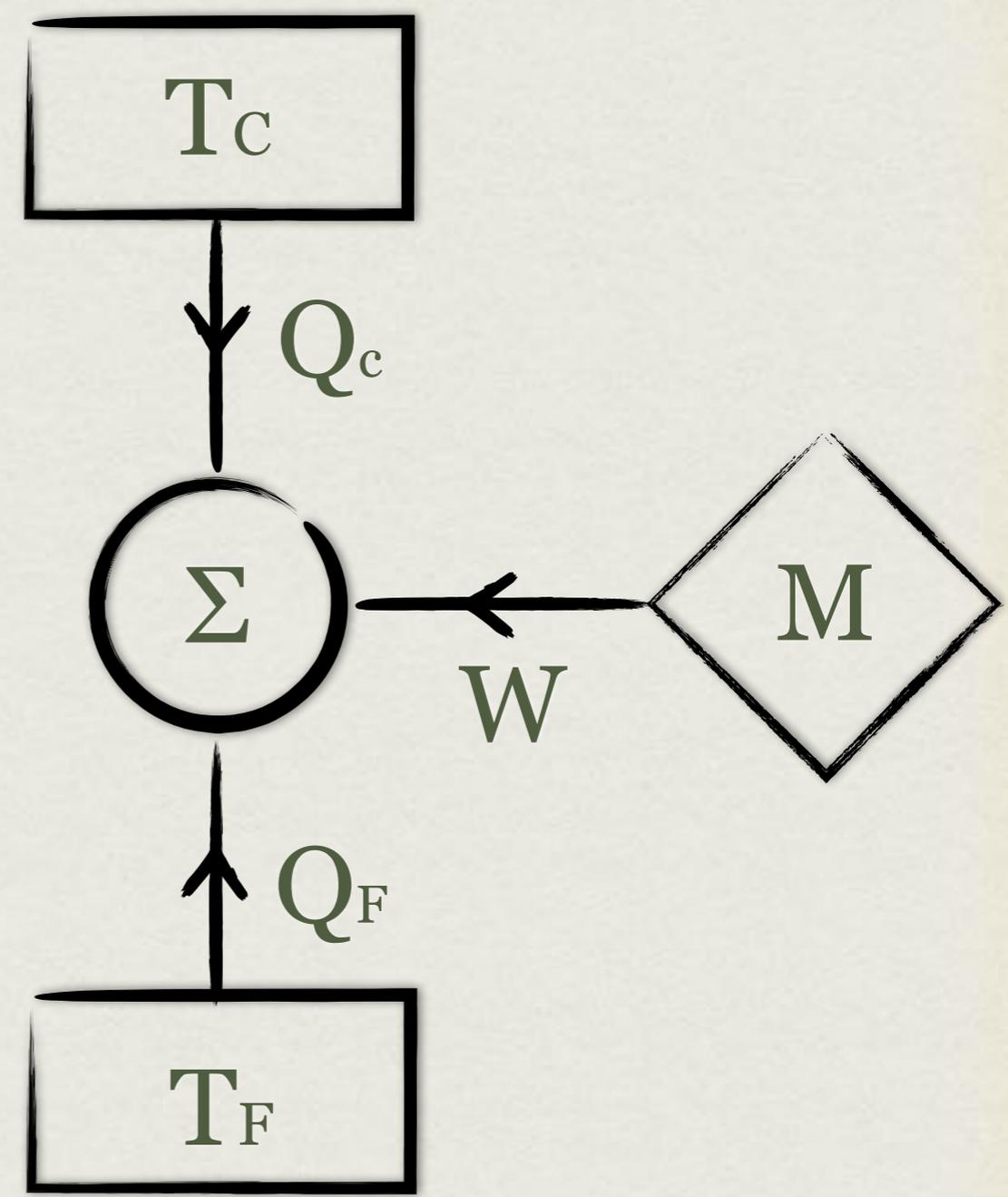


Montrer que :

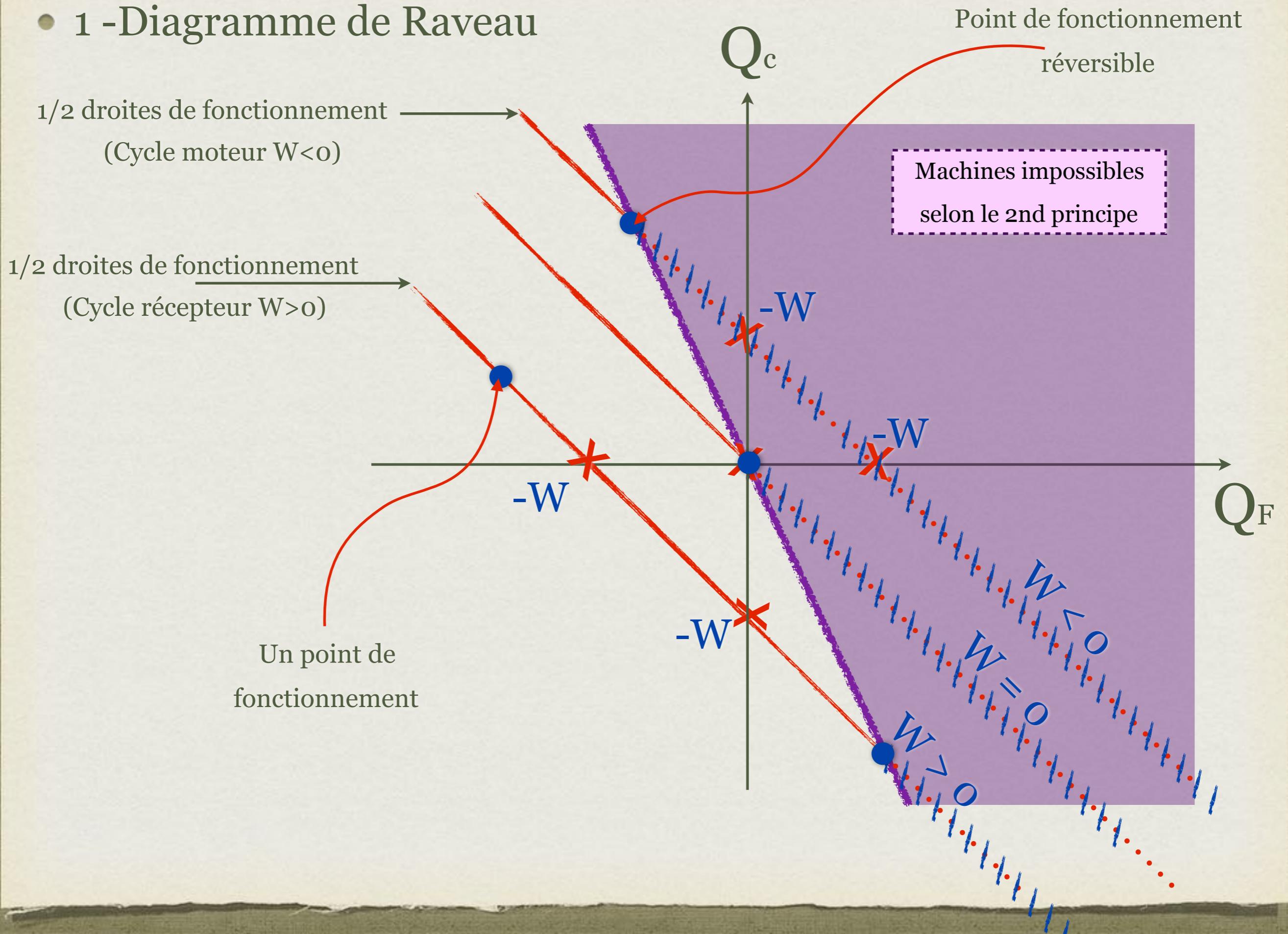
$$\sum_k \frac{Q_k}{T_k} \leq 0$$

# II MACHINES THERMIQUES DITHERMES

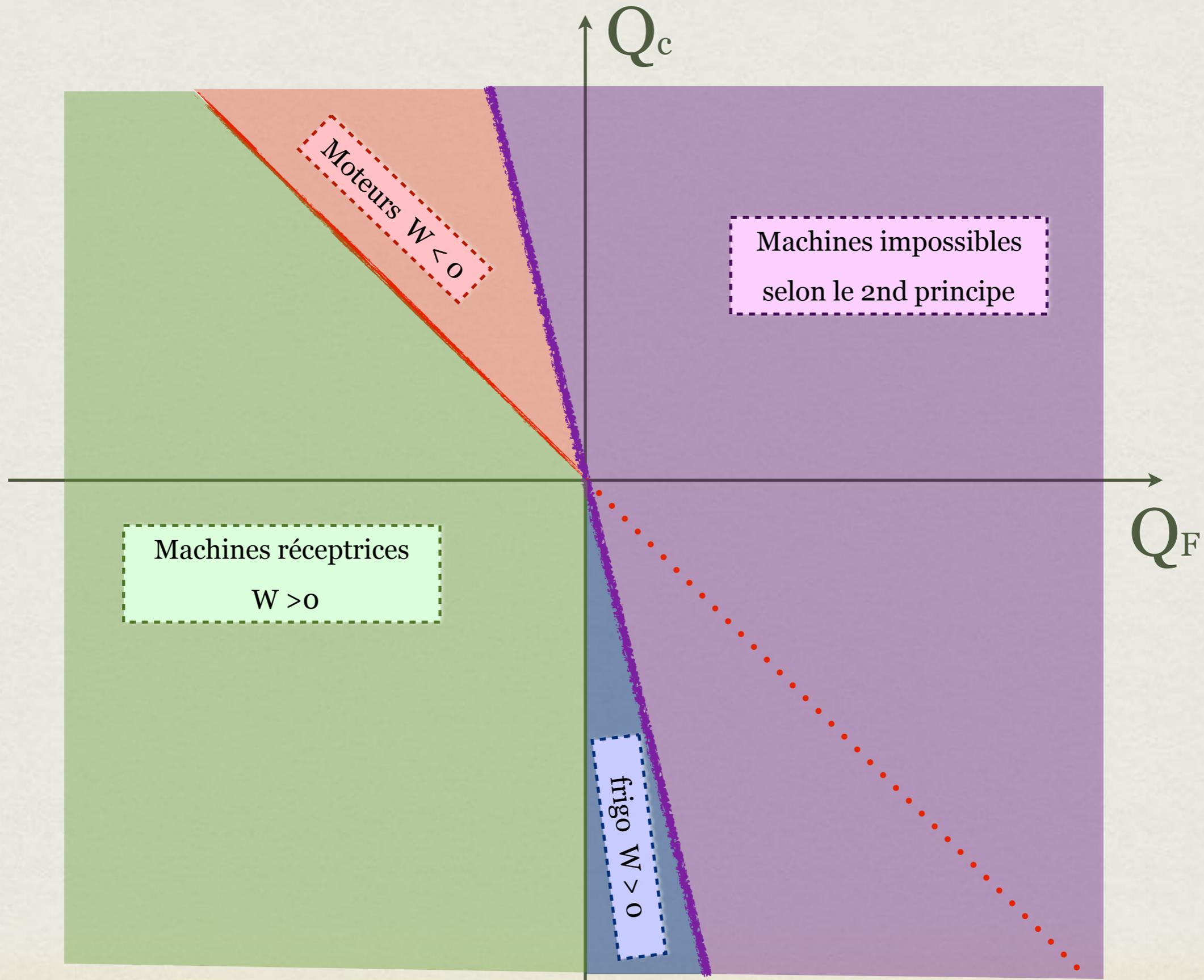
- Diagramme de Raveau
- Moteurs dithermes
- Le réfrigérateur
- Les pompes à chaleurs



# 1 - Diagramme de Raveau



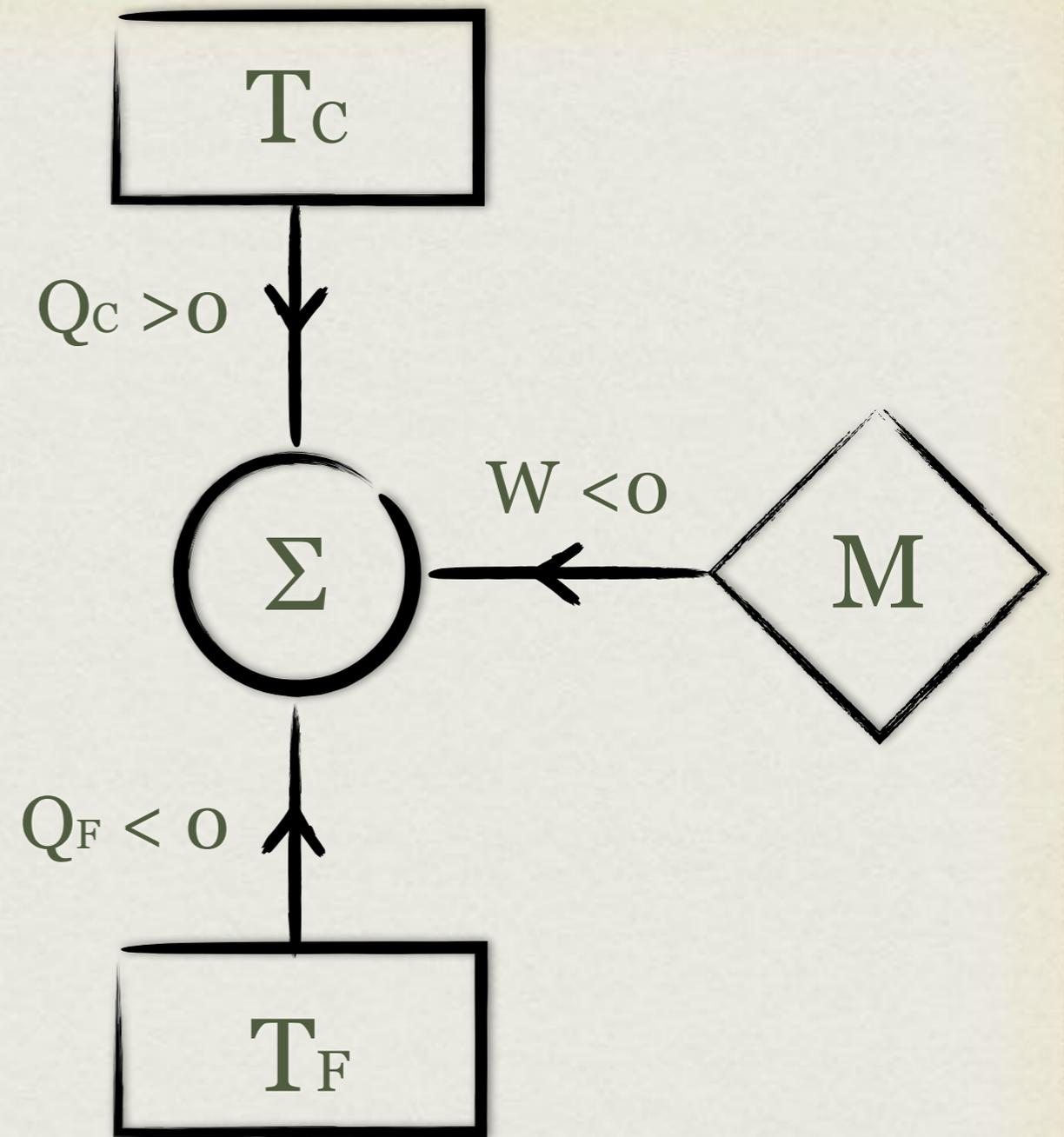
# Résumé des machines dithermes :



- 2 -Moteurs dithermes

On veut prélever du travail lors  
de l'écoulement de chaleur

$$W < 0$$



## Rendement d'un moteur :

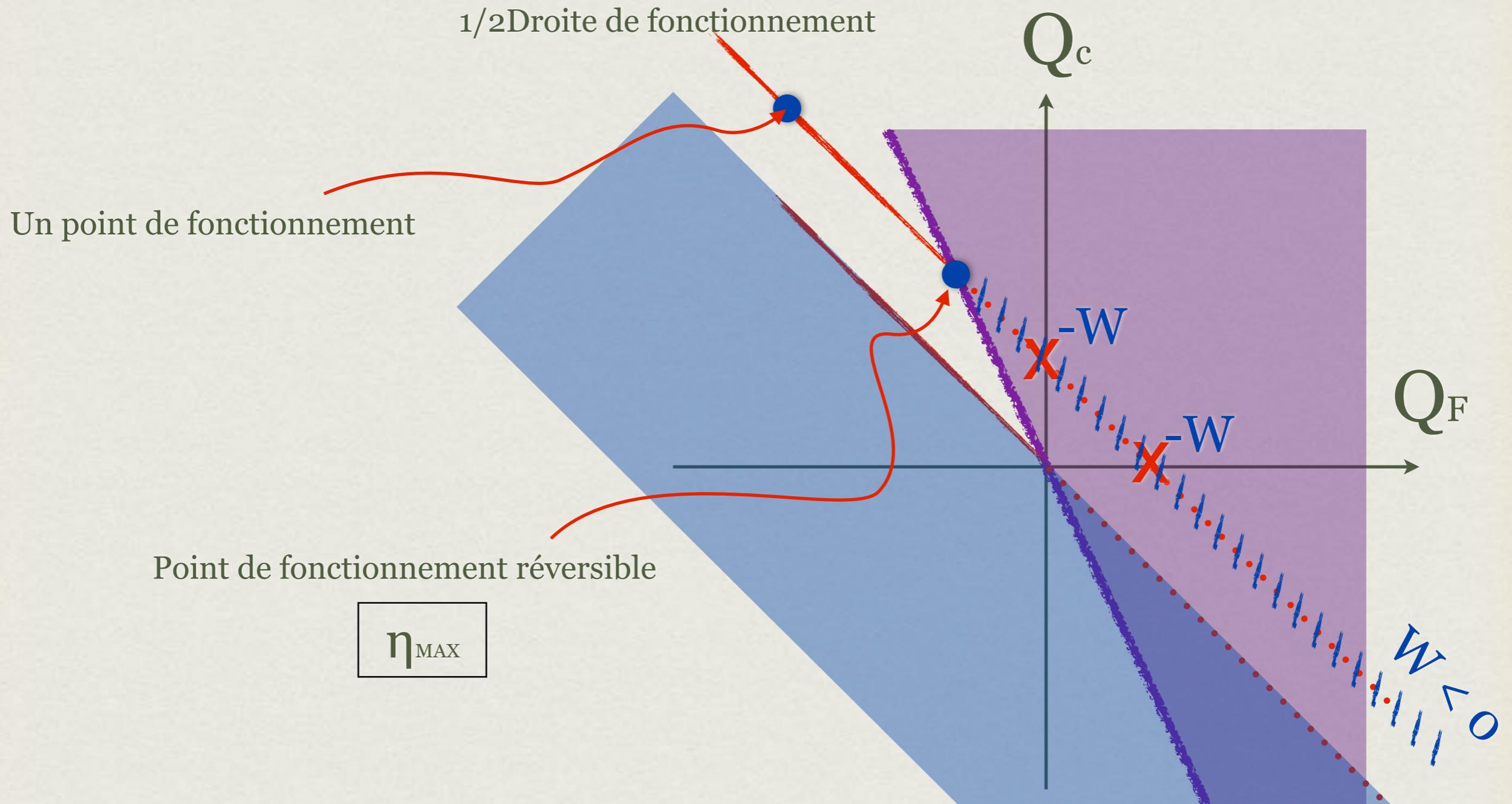
$$\eta = \frac{\text{Ce que rapporte le moteur}}{\text{Ce que coûte le moteur}} = \frac{\text{travail produit}}{\text{chaleur reçue}} = \frac{-W}{Q_C}$$

Ier Principe : 1er principe / cycle  $\Rightarrow$  exprimer  $W$  à partir des chaleurs

IIème Principe : 2nd Principe sur cycle  
 $\Rightarrow$  exprimer le rendement en fonction de  $Q_C$ ,  $Q_F$  et les Températures

Montrer que  $\eta = 1 - \frac{T_F}{T_C}$  si réversible

# Diagramme de Raveau :



## Théorème de Carnot

Le rendement maximum de tout moteur ditherme est obtenu pour un fonctionnement réversible et ne dépend que du rapport des températures par :

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

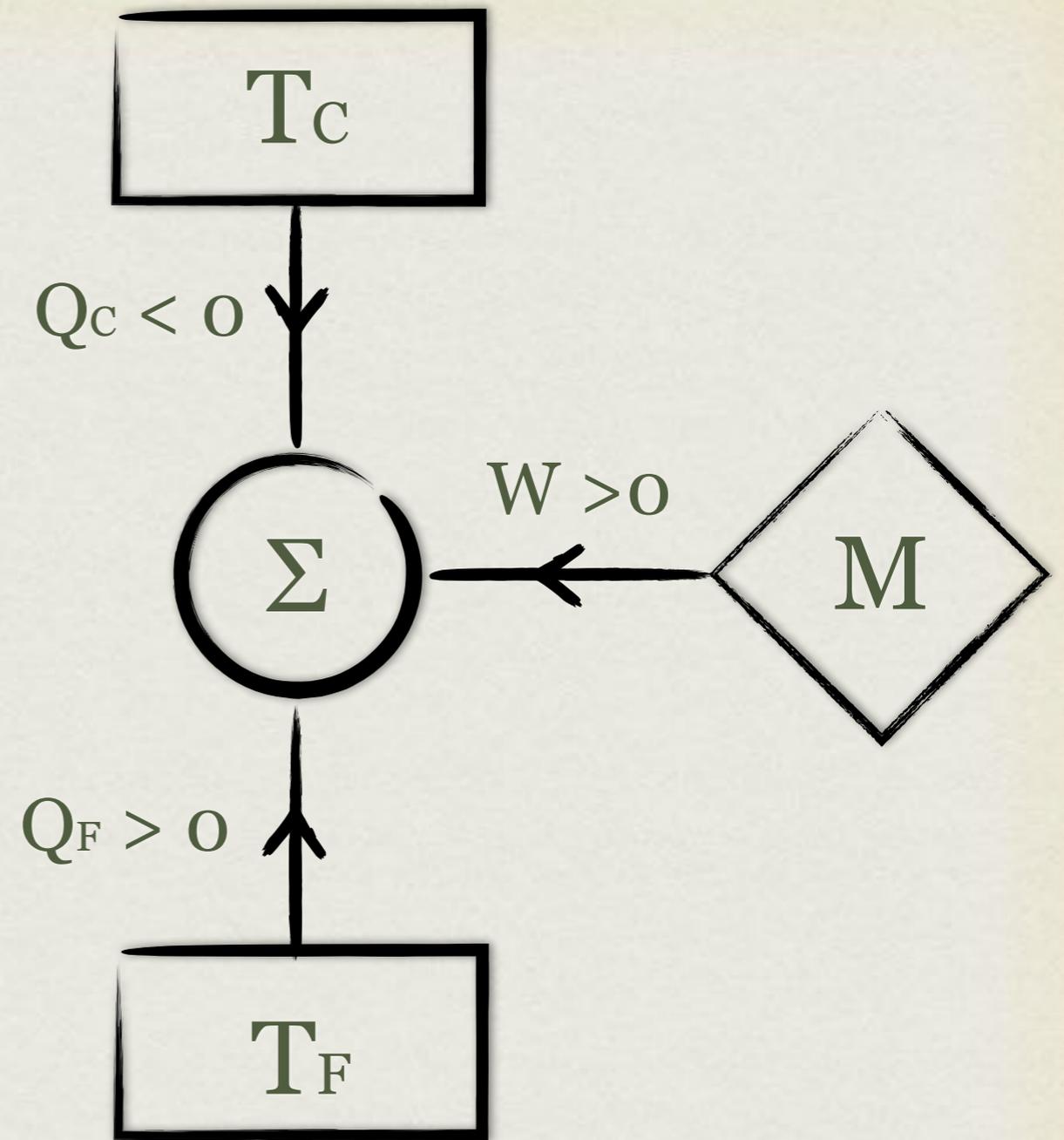
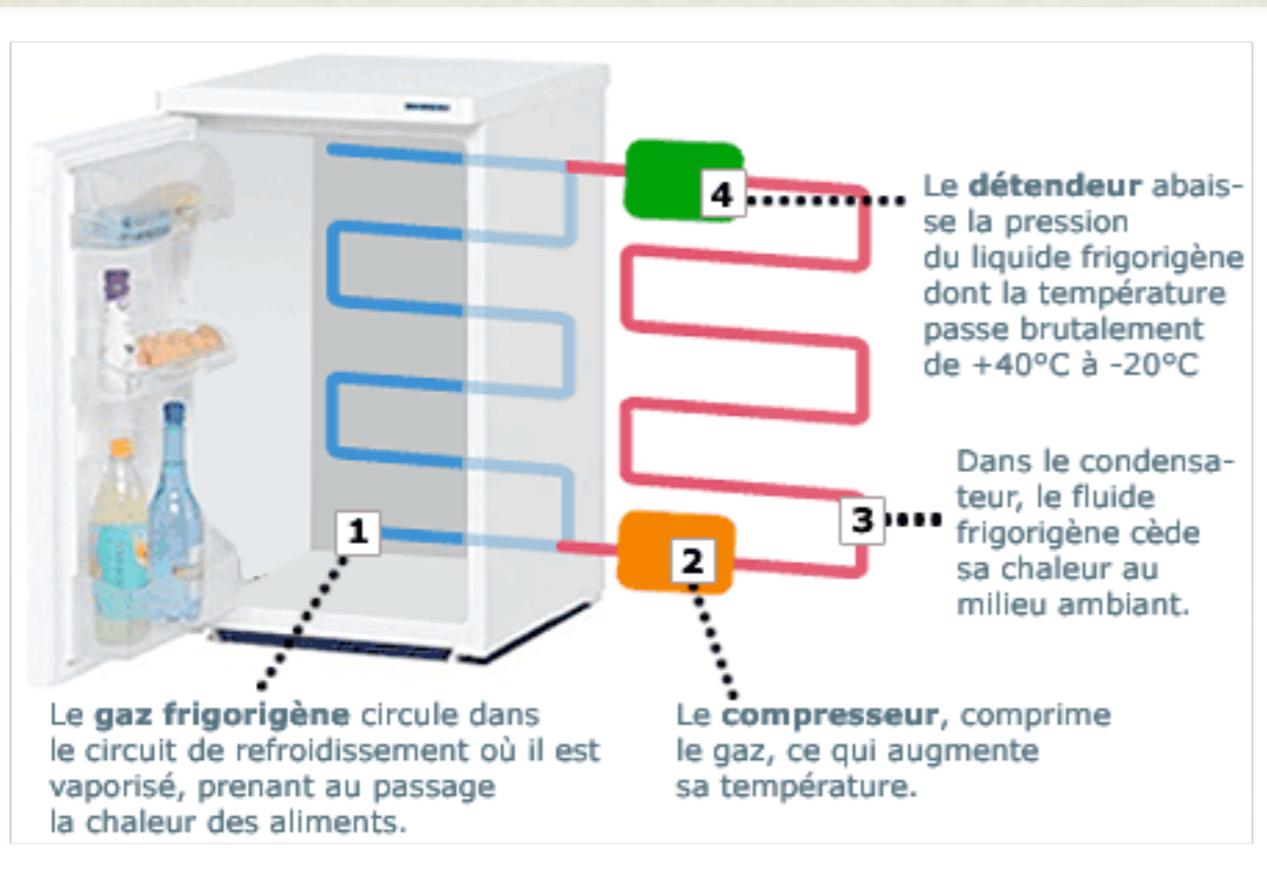
AN : On prendra  $T_f = 300\text{K}$  et  $T_c = 500\text{K}$

PB : Rendement ou puissance ?

Peut-on avoir les deux ?  
oui / non pourquoi ?

- 3 -Le réfrigérateur

On veut enlever de la chaleur au réfrigérateur



$\Sigma$  : fluide frigorigène

# Résolution de Problème

Pour lutter contre le réchauffement climatique qui sévit en ces temps barbares :

**Jojo l'écolo décide de laisser la porte de son frigo ouverte !!!**

Que pensez-vous de l'efficacité de sa méthode ?

# Efficacité d'un réfrigérateur :

On ne parle pas de rendement car  $e > 1$

$$e = \frac{\text{Ce que rapporte le réfrigérateur}}{\text{Ce que coûte le réfrigérateur}} = \frac{\text{chaleur prélevée}}{\text{travail fourni}} = \frac{Q_F}{W}$$

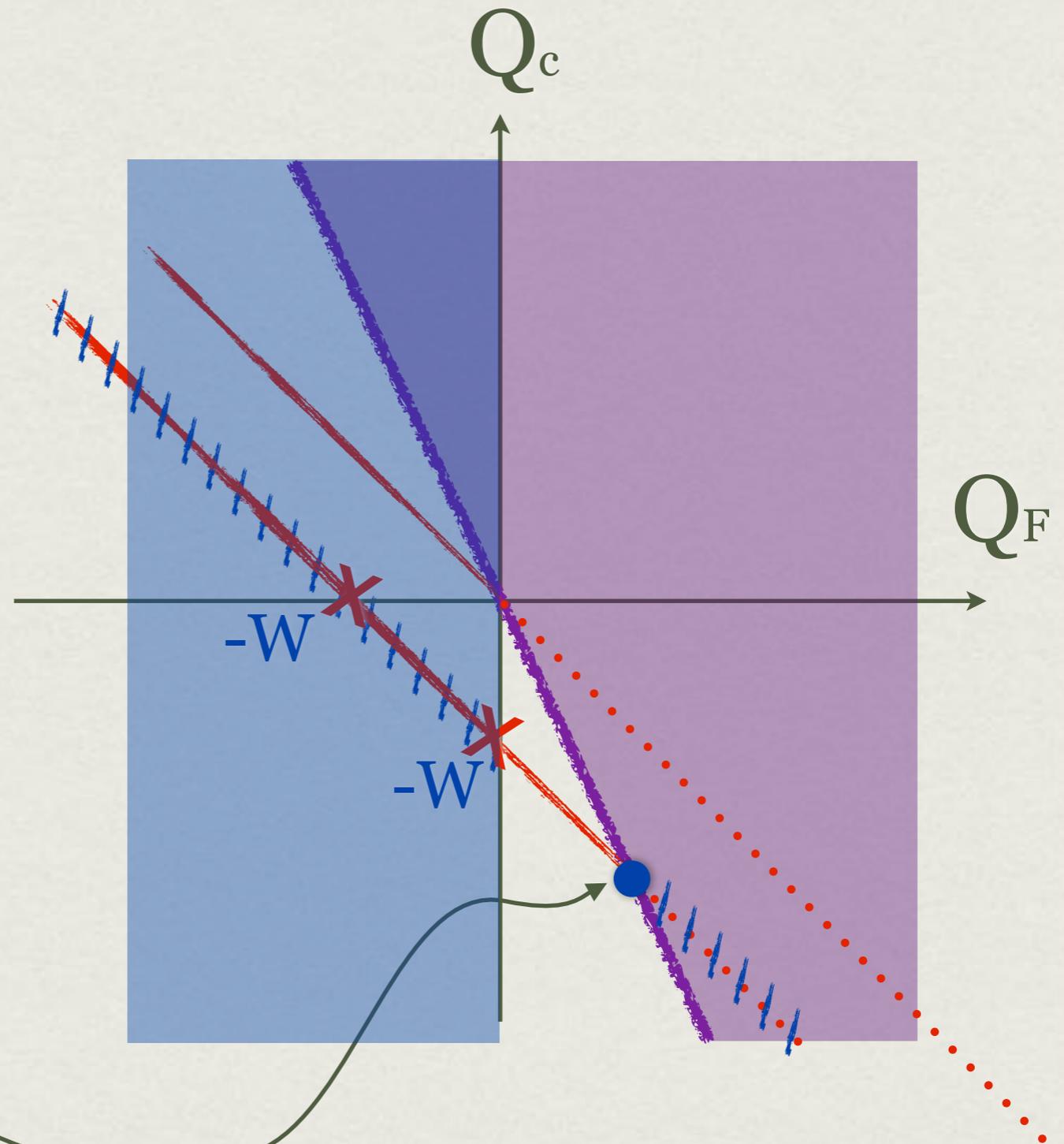
Ier Principe : 1er principe / cycle  $\Rightarrow$  exprimer  $W$  à partir des chaleurs  
en déduire  $1/e$

IIème Principe : 2nd Principe sur cycle  
 $\Rightarrow$  exprimer  $1/e$  en fonction de  $S_c$ ,  $Q_f$  et les Températures

Montrer que

$$e_{MAX}^{th} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad \text{AN}$$

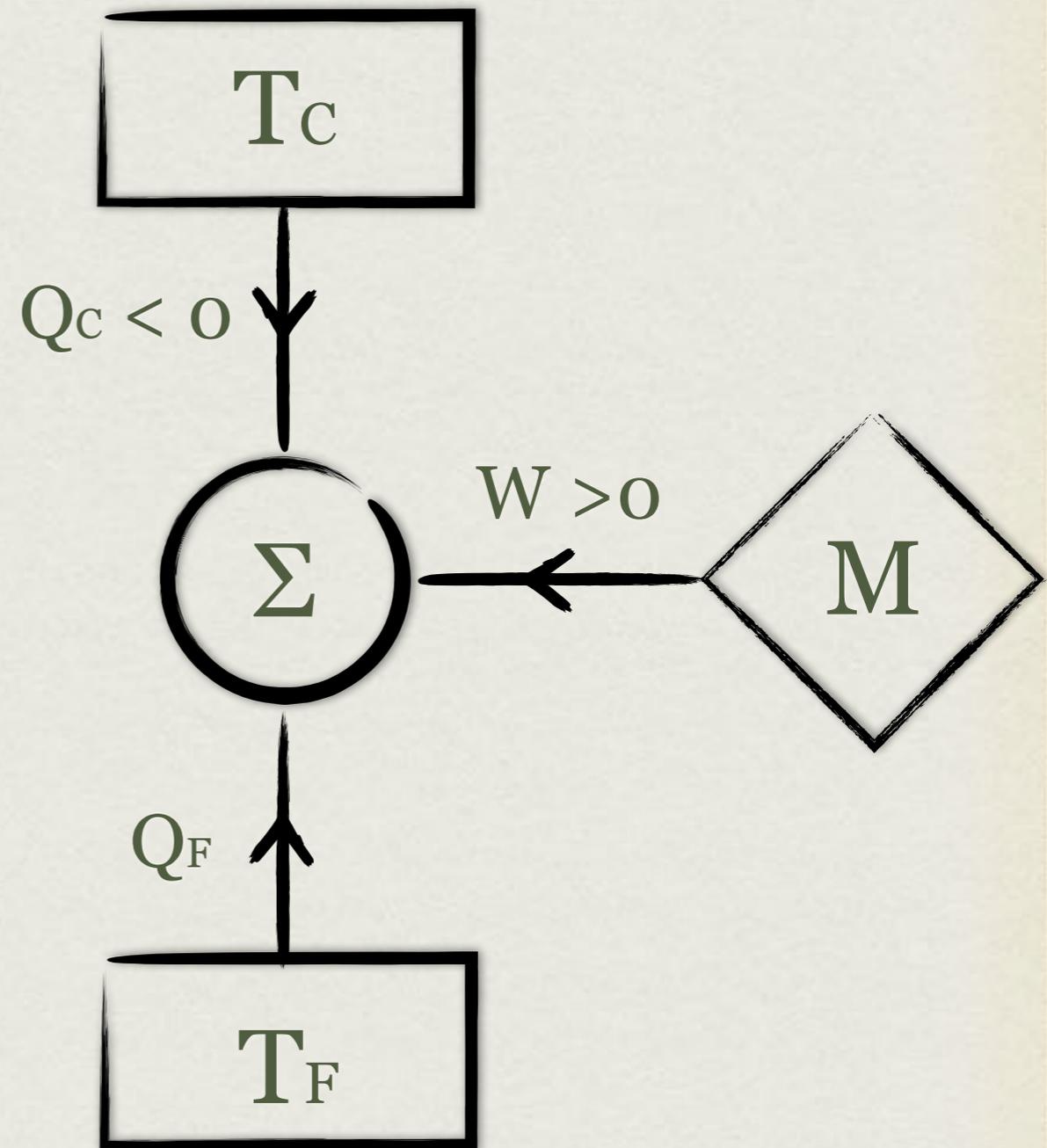
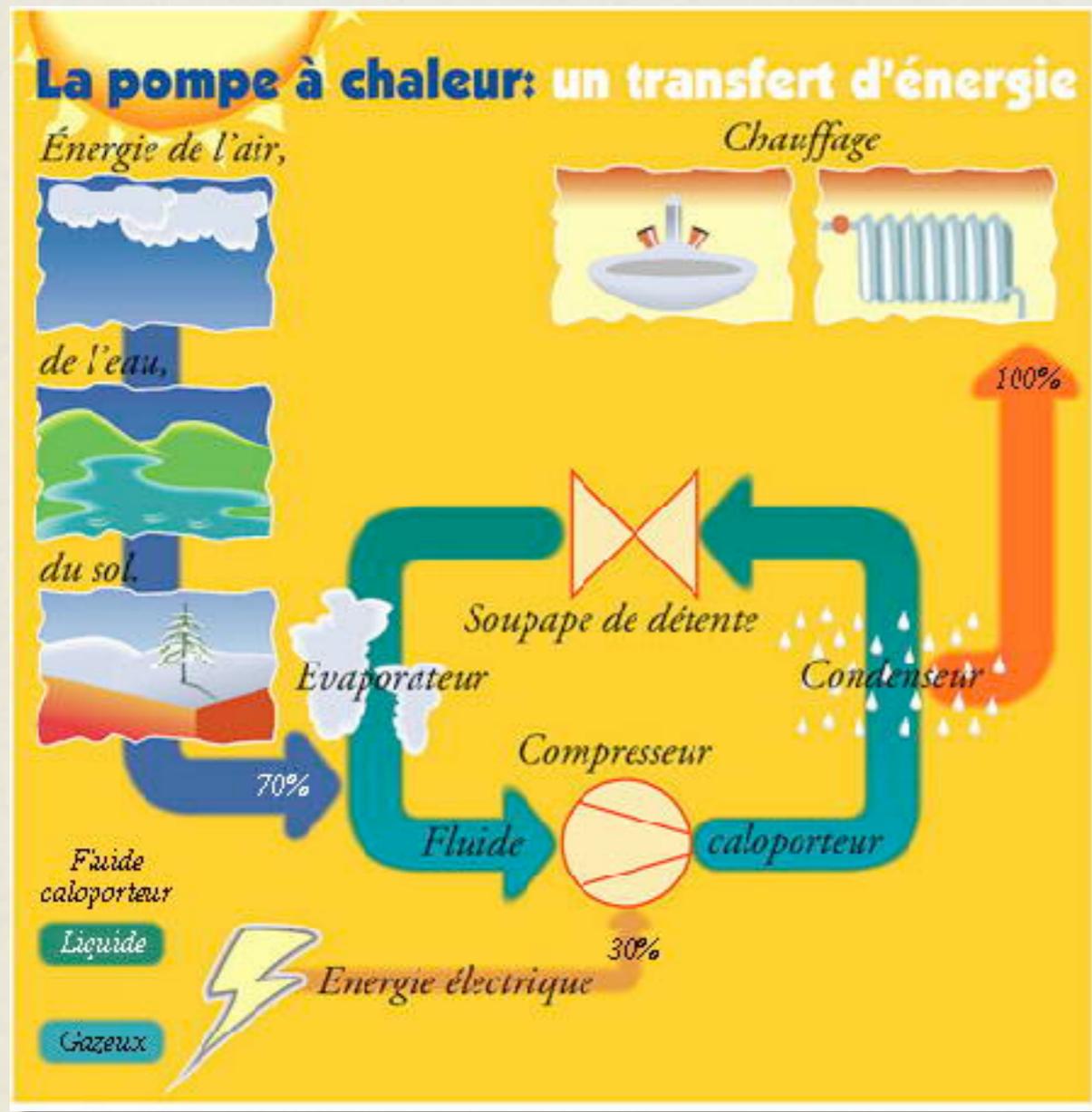
# Diagramme de Raveau :



Point de fonctionnement réversible

- 4 - Les pompes à chaleurs (PAC)

On veut pomper de la chaleur vers la source chaude



En pratique il faut :  $Q_F > 0$

## Efficacité d'une pompe à chaleur :

$$e = \frac{\text{Ce que rapporte la PAC}}{\text{Ce que coûte la PAC}} = \frac{\text{chaleur donnée}}{\text{travail fourni}} = \frac{Q_C}{W}$$

Ier Principe : 1er principe / cycle  $\Rightarrow$  exprimer  $W$  à partir des chaleurs  
en déduire  $1/e$

IIème Principe : 2nd Principe sur cycle  
 $\Rightarrow$  exprimer  $1/e$  en fonction de  $S_C$ ,  $Q_C$  et les Températures

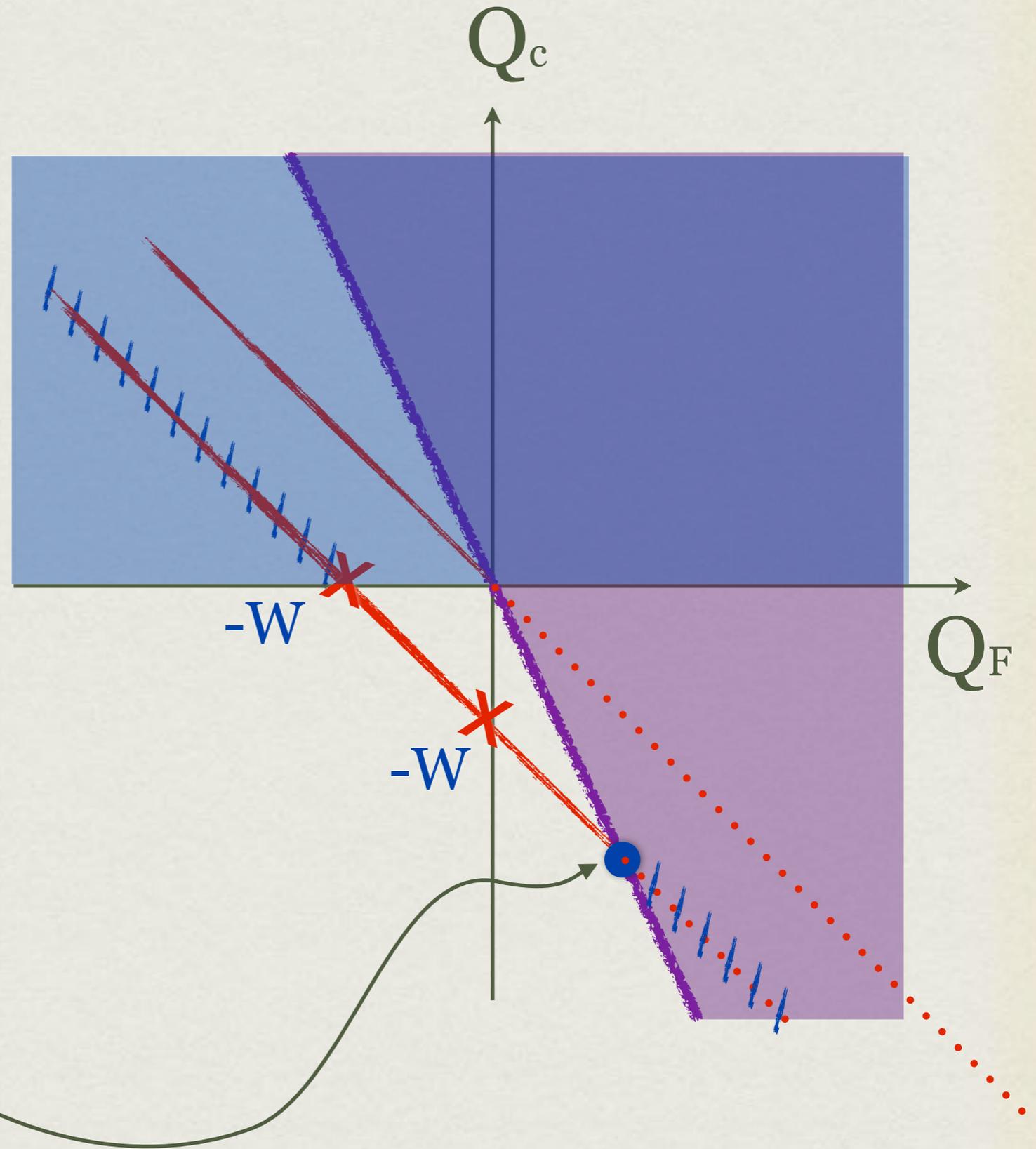
Montrer que

$$e_{MAX}^{th} = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad \text{AN}$$

# Diagramme de Raveau :



Une P.A.C



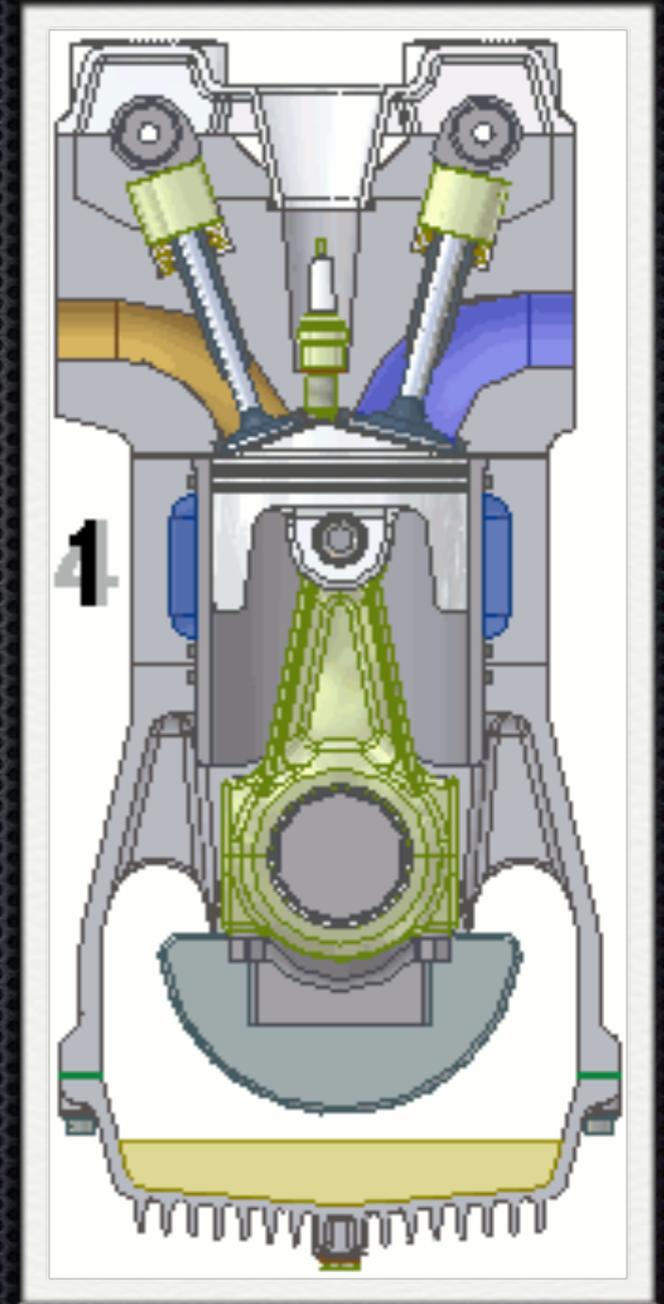
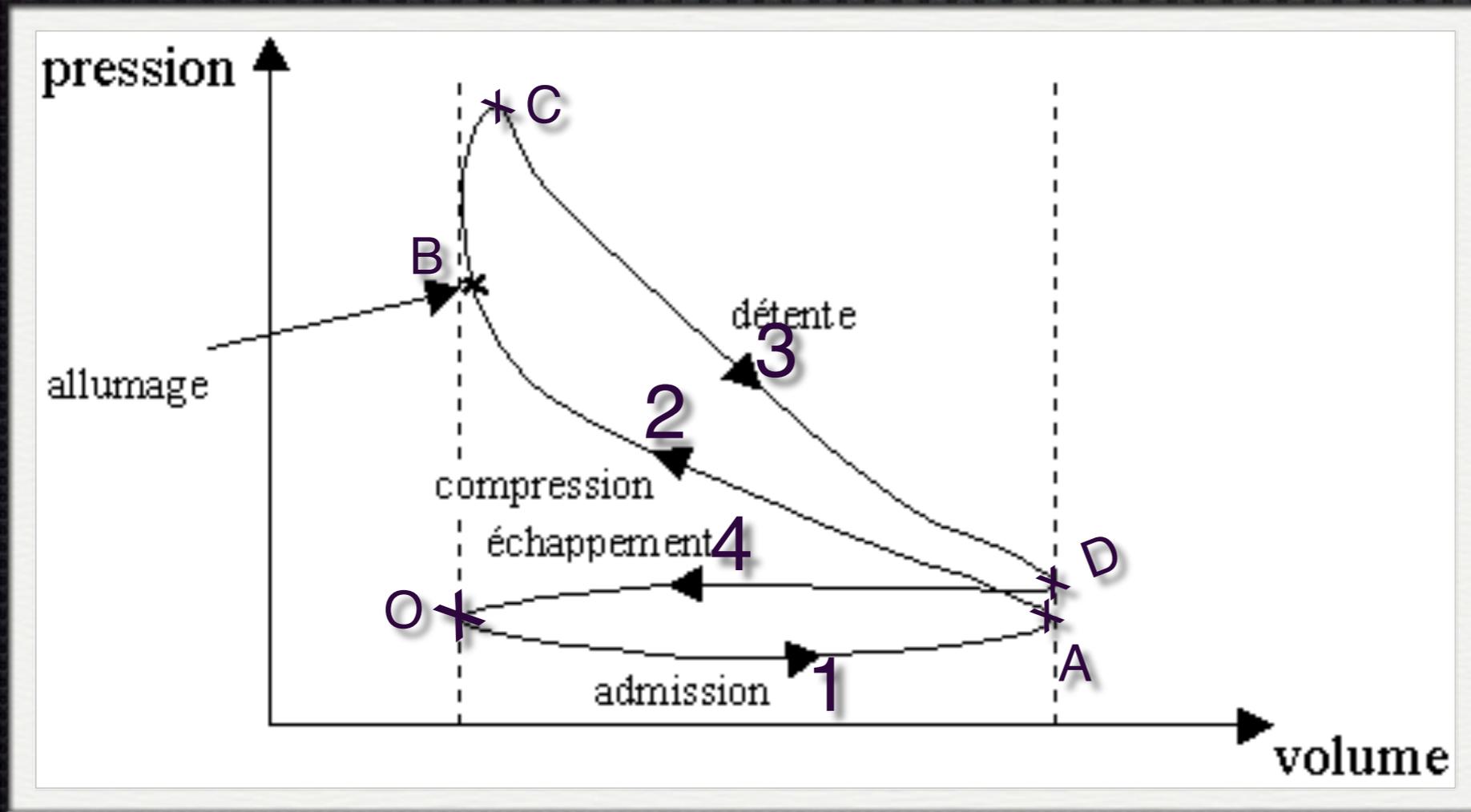
Point de fonctionnement réversible

# III Les cycles moteurs

## Les moteurs à quatre temps

- Principe
- Modélisation du moteur à essence
- Les cycles courants

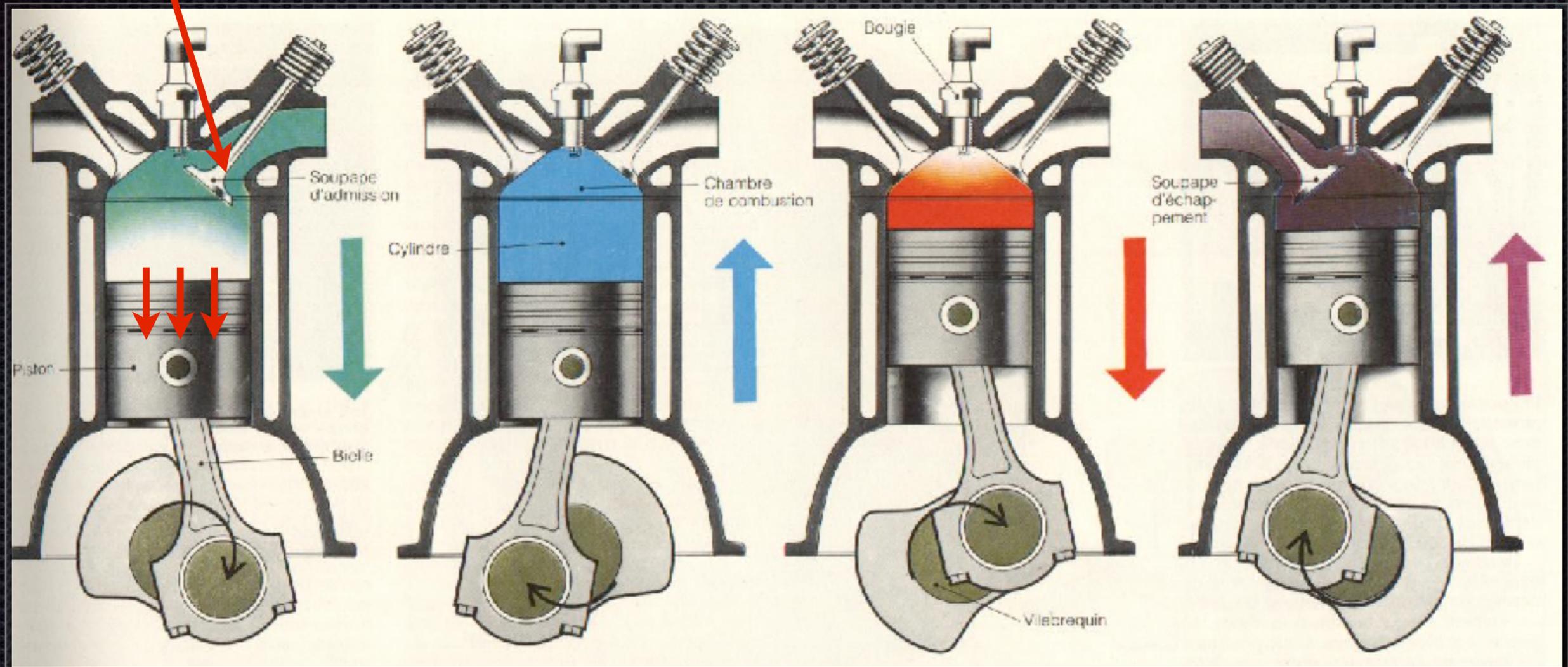
# Principe général



RQ : seuls OA et CD sont des temps moteurs, les autres temps étant récepteurs

# Les quatre temps

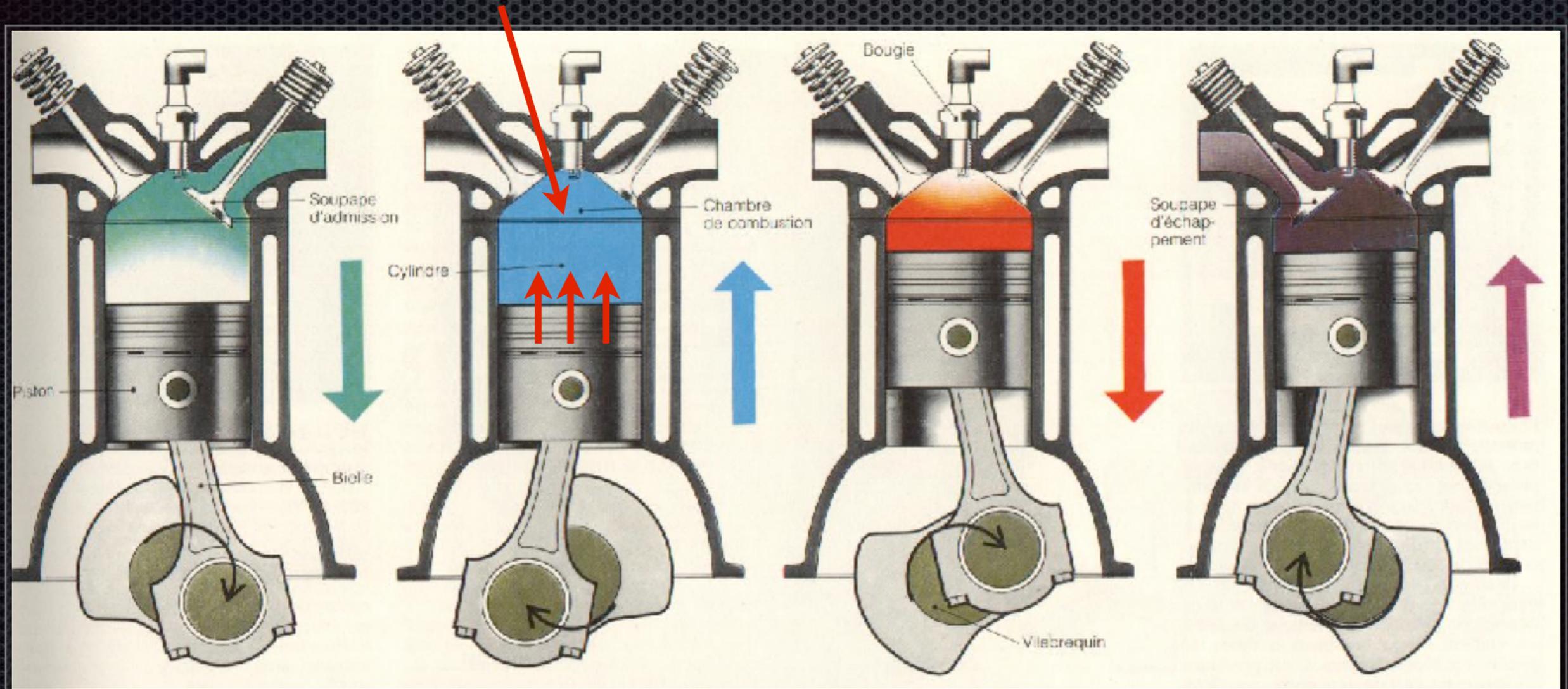
Admission    compression    détente    échappement



$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$      $V_{\max} \rightarrow V_{\min}$      $V_{\min} \rightarrow V_{\max}$      $V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

# Les quatre temps

Admission    compression    détente    échappement



$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$

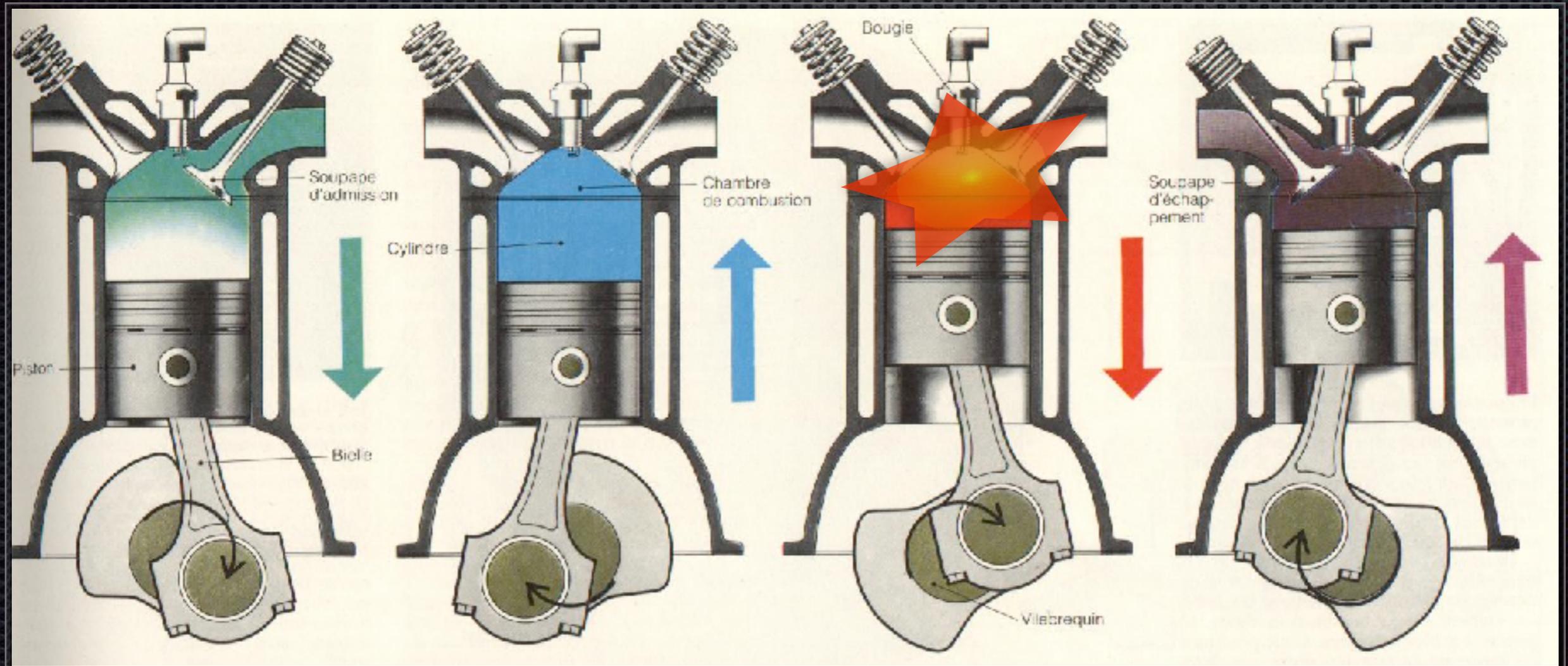
$V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$

$V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

# Les quatre temps

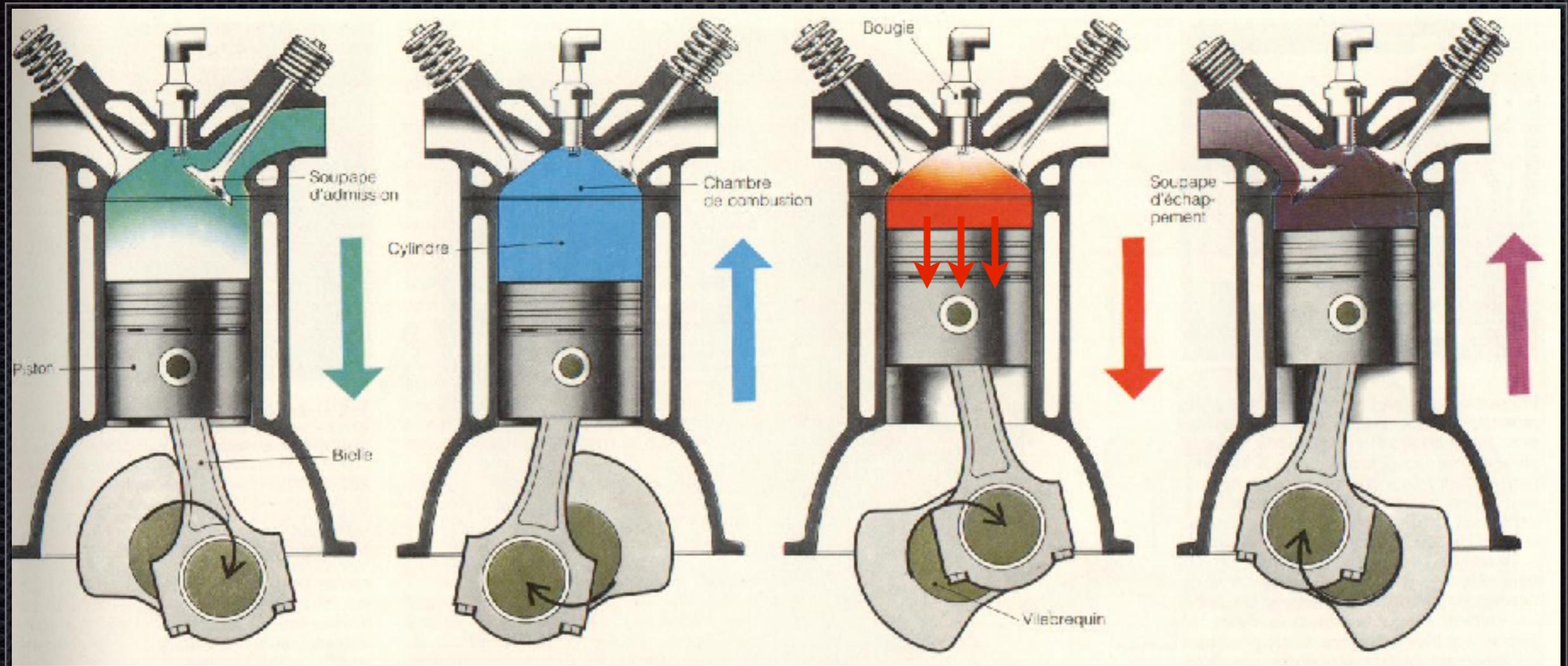
Admission    compression    **Explosion**    détente    échappement



$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$      $V_{\max} \rightarrow V_{\min}$      $V_{\min} \rightarrow V_{\max}$      $V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

# Les quatre temps

Admission    compression    détente    échappement



$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$

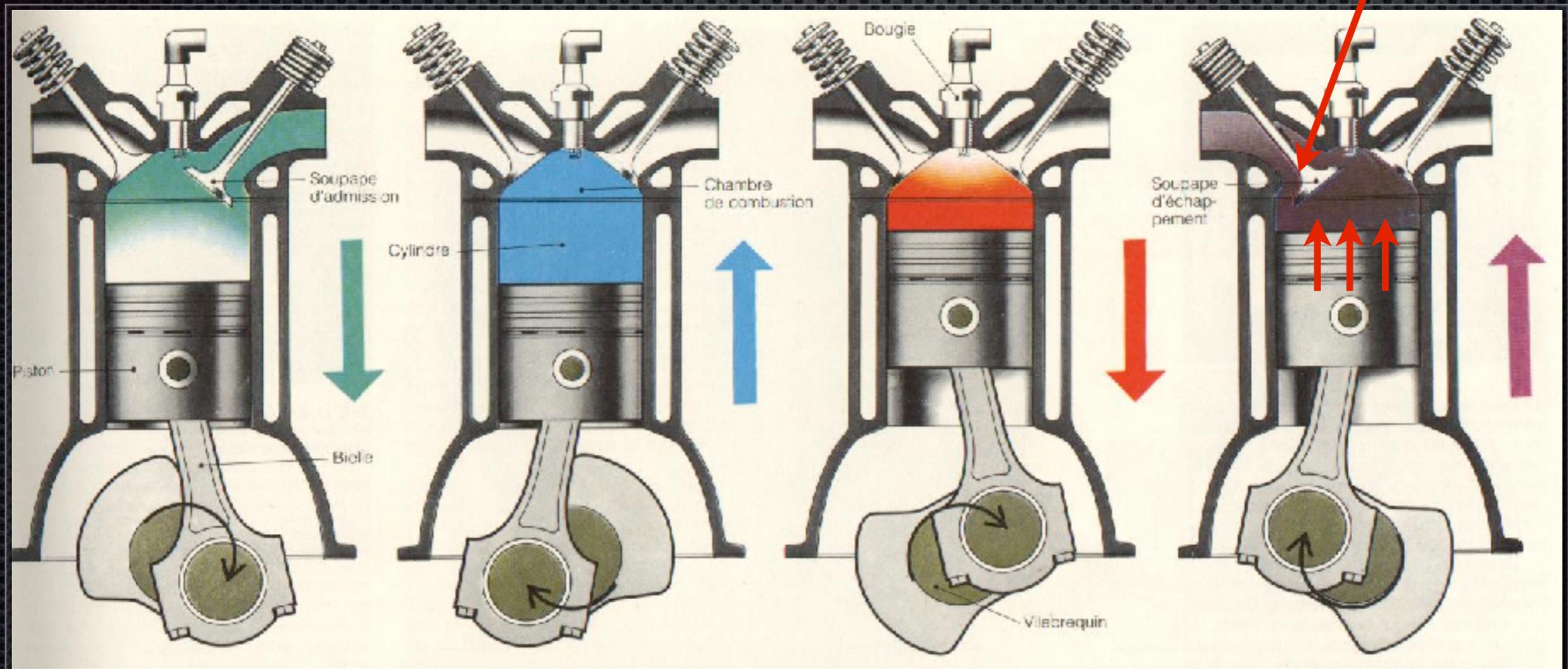
$V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$

$V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

# Les quatre temps

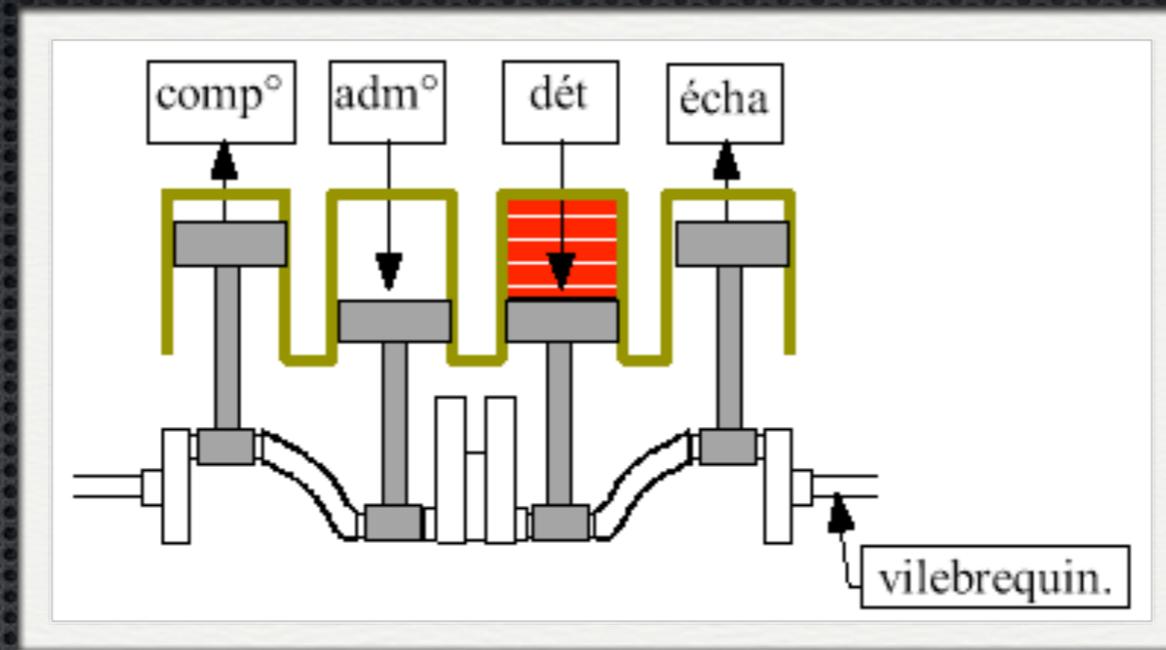
Admission    compression    détente    échappement



$V_{\min} \rightarrow V_{\max}$      $V_{\max} \rightarrow V_{\min}$      $V_{\min} \rightarrow V_{\max}$      $V_{\max} \rightarrow V_{\min}$

RQ: Ne pas noter

En pratique Il y a quatre cylindres qui sont déphasés d'un quart de période :

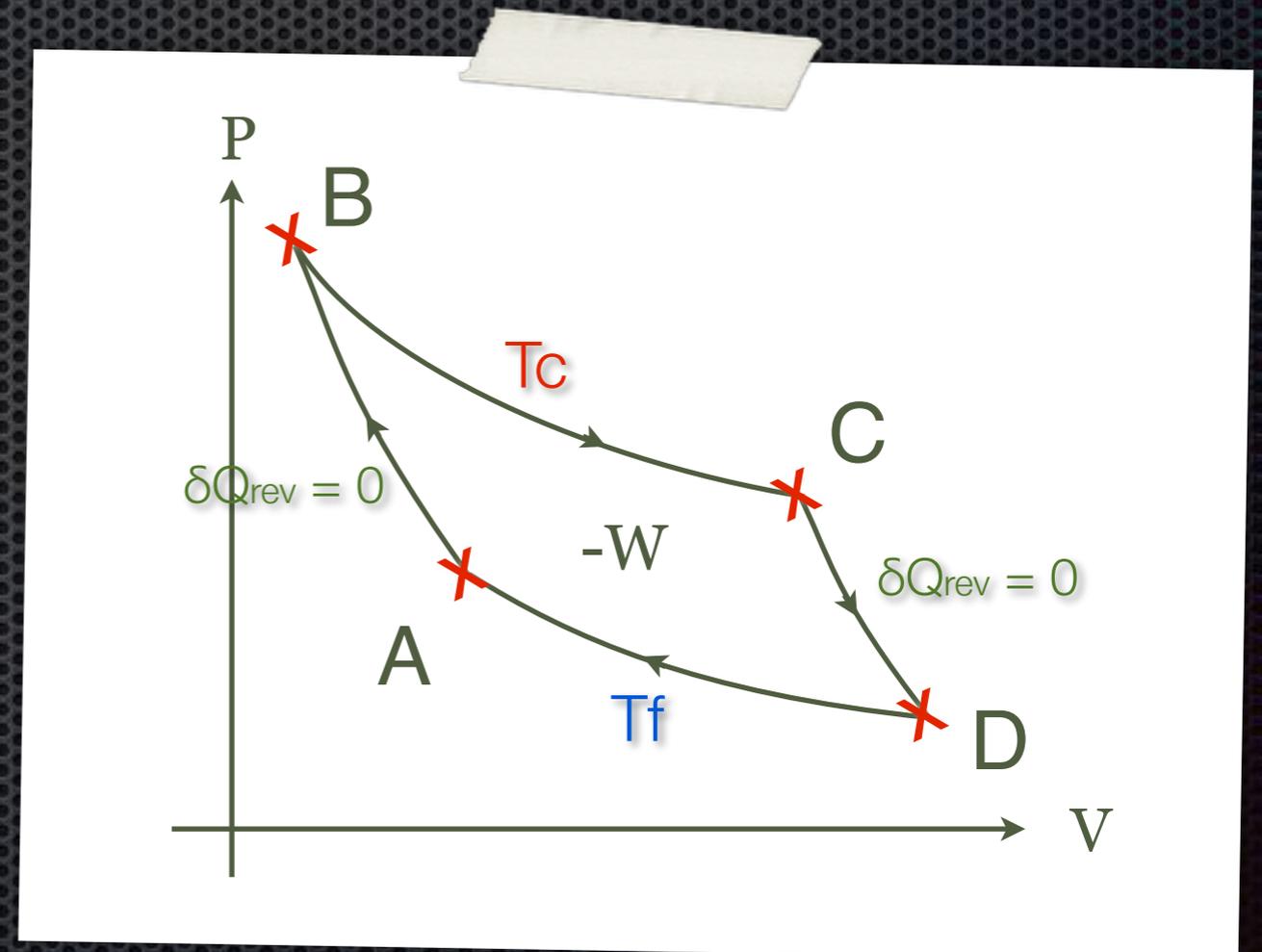
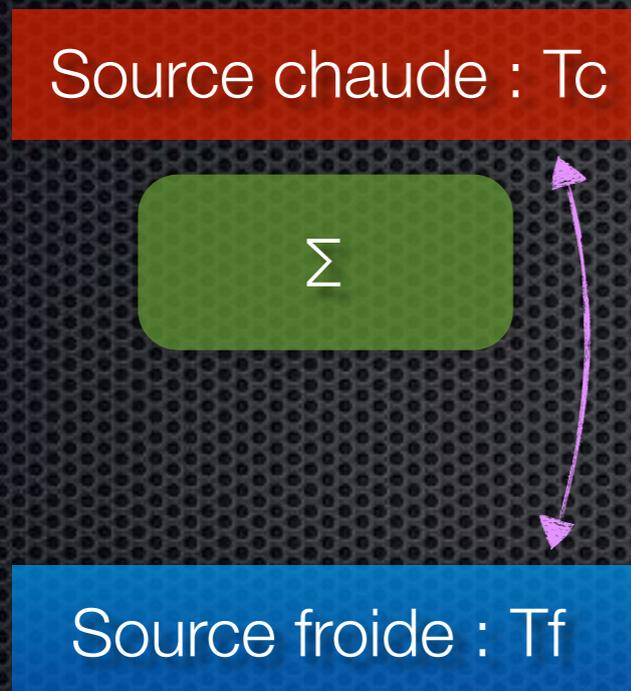


RQ : Pour des raisons d'équilibrage mécanique l'ordre d'allumage est 3124

Ordre des cycles : 3-1-2-4-3-1-2-4-3 etc

# Construction du cycle moteur :

→ à partir du cycle de Carnot



$$\eta = 1 - T_f / T_c$$

a - Définir le rendement

b - 1er principe / cycle  $\Rightarrow$  exprimer  $W$  à partir des chaleurs

Au delà, la démarche est différente de celles-vues précédemment :  
On veut exploiter la connaissance du cycle et non plus le second principe.

c - Sur quelles portions du cycle échange t-on  $Q_c$  et  $Q_f$  ?

d - Calculer ces 2 chaleurs échangées.

e - en déduire l'expression du rendement

f - Quelles lois s'appliquent sur les transformations AB et CD ?

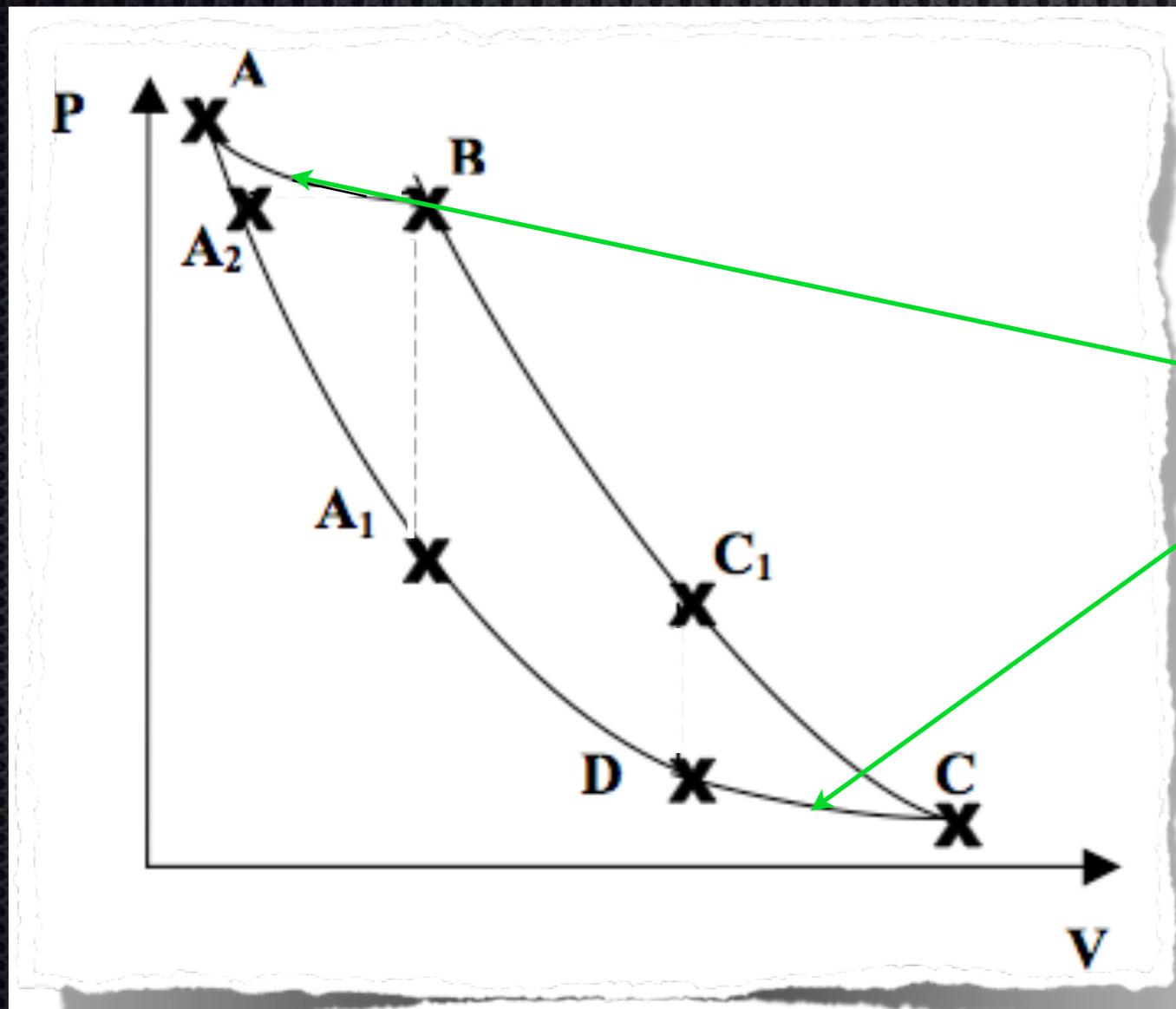
Utiliser l'une de ces lois pour relier les températures et les volumes sur chacune.

g - Montrer que  $V_D/V_A = V_C/V_B$ .

En déduire le rendement en fonction des températures seules

# Construction du cycle moteur : → à partir du cycle de Carnot

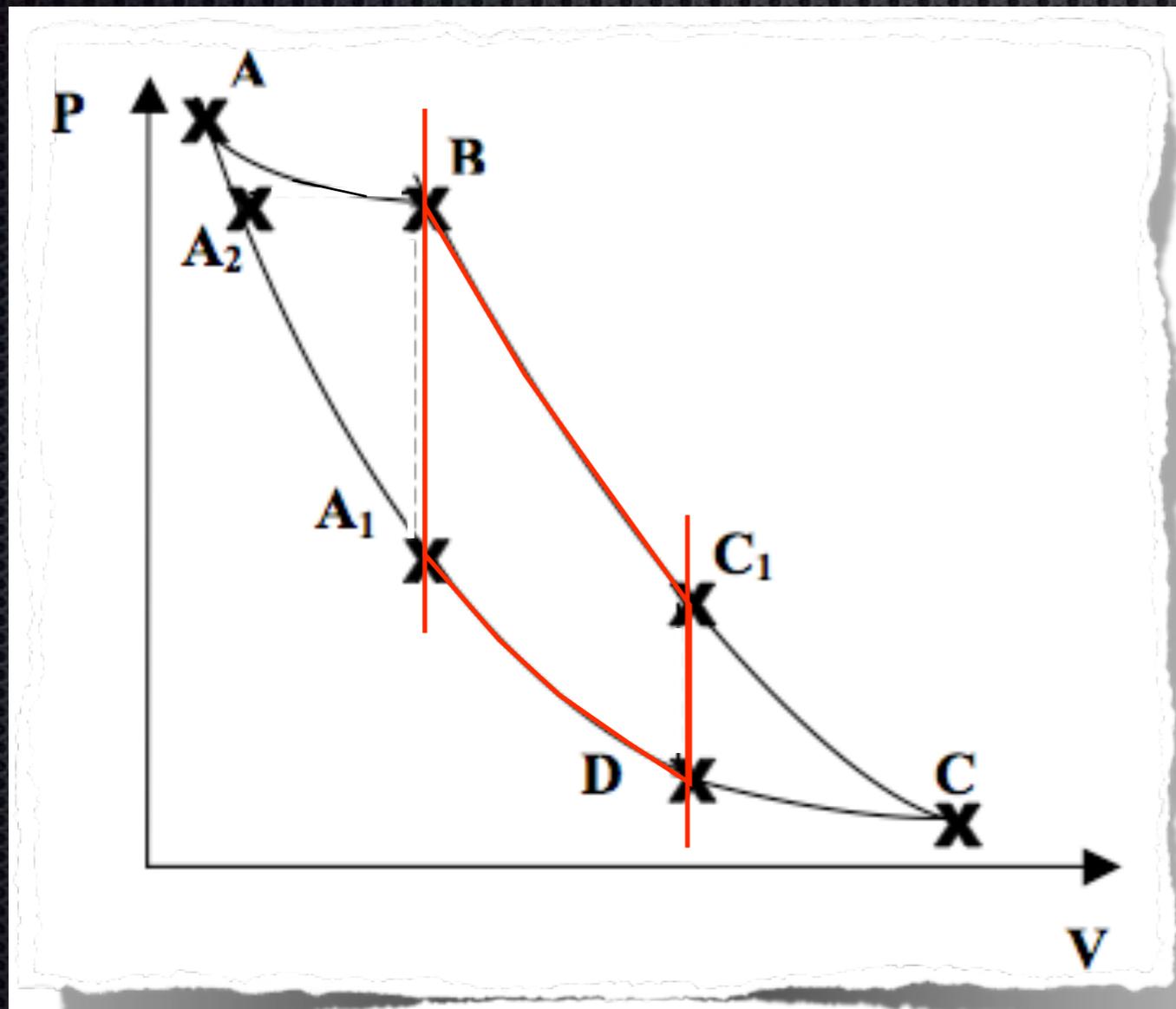
Le cycle de Carnot a le meilleur rendement possible mais ...



Transferts de chaleur très lents sur les isothermes

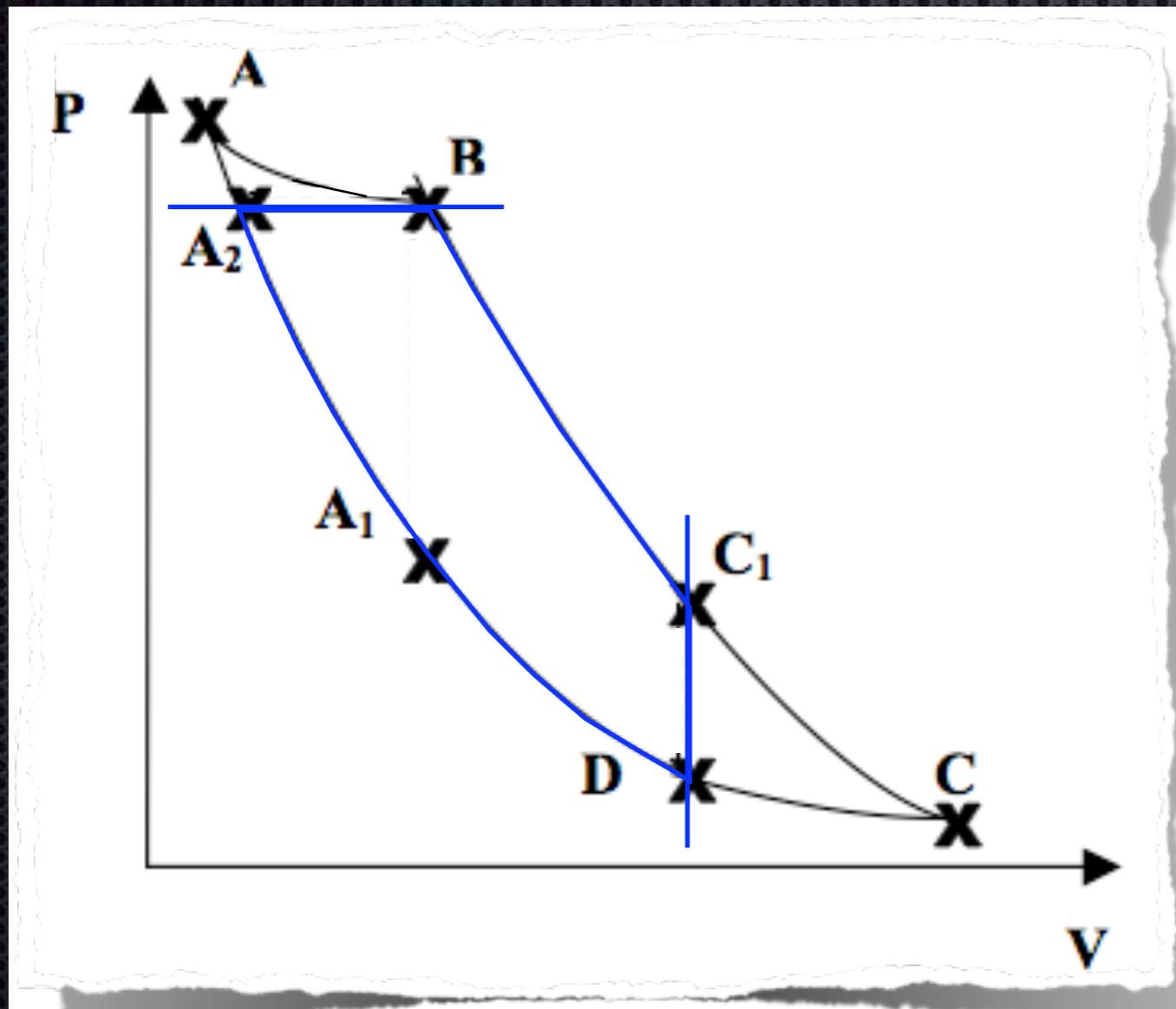
=> Impossible d'en extraire de la puissance

Construction du cycle moteur :  
→ à partir du cycle de Carnot



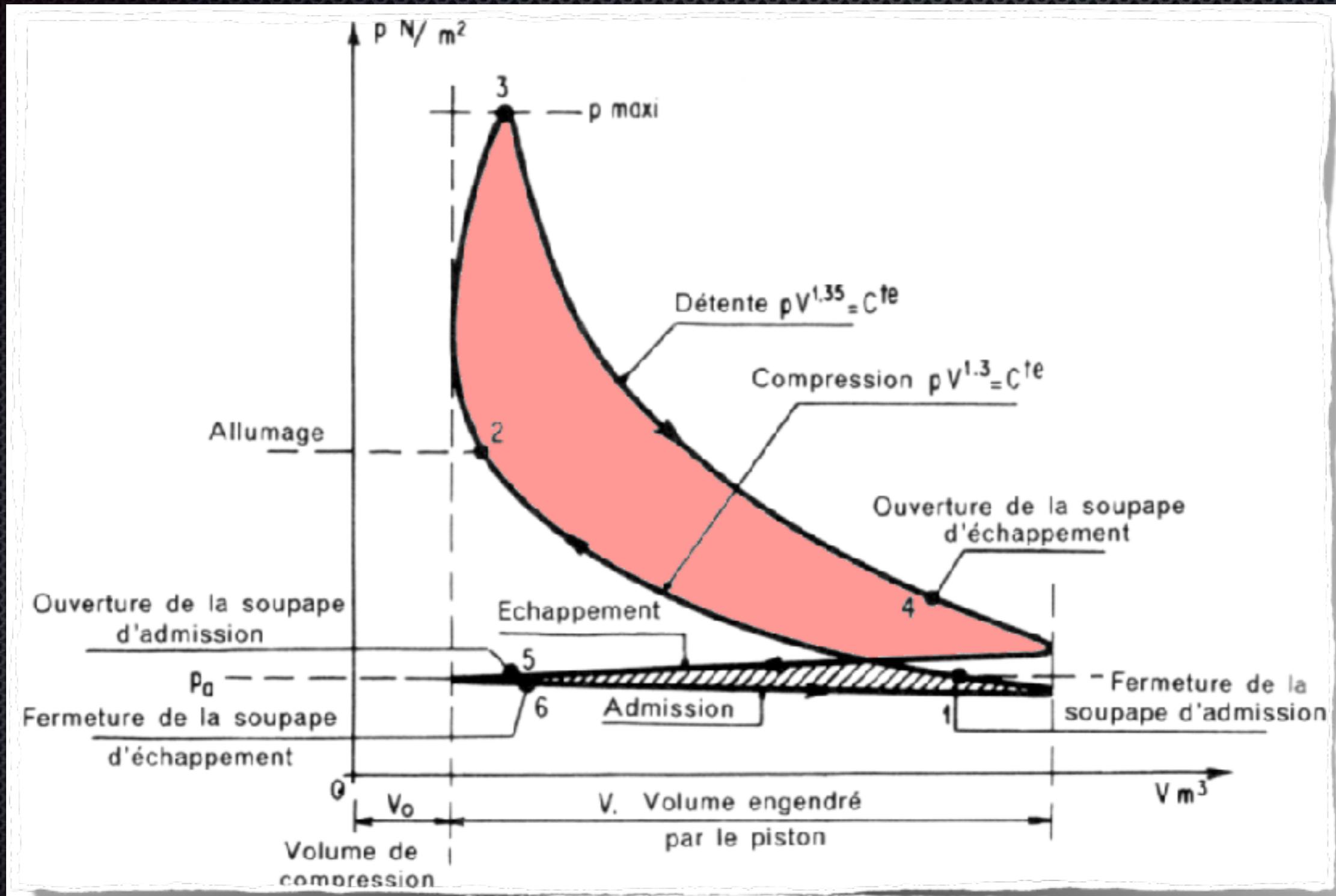
Cycle de Beau de Rochas

Construction du cycle moteur :  
→ à partir du cycle de Carnot



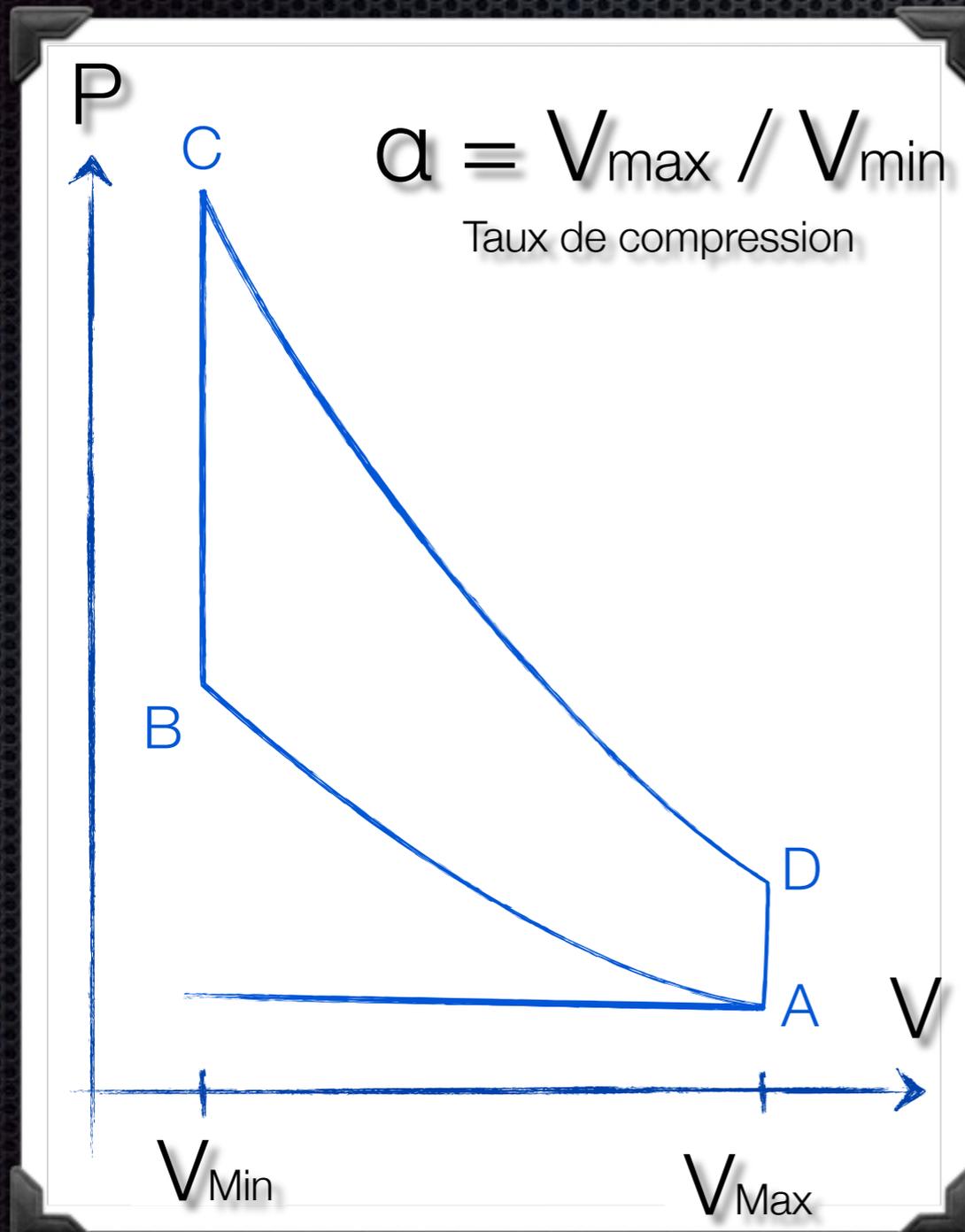
Cycle de Diesel

# Le cycle du moteur à essence :



# Modélisation du cycle essence :

## Le cycle de Beau de Rochas



2 isochores



2 adiabatiques réversibles



Pas de cycle résistant

$$\eta = 1 - a^{1-\gamma}$$

$$\eta^{\text{th}} = 64\%$$

a - Définir le rendement

b - 1er principe / cycle  $\Rightarrow$  exprimer  $W$  à partir des chaleurs

Au delà, la démarche est différente de celles-vues précédemment :  
On veut exploiter la connaissance du cycle et non plus le second principe.

c - Sur quelles portions du cycle échange t-on  $Q_c$  et  $Q_f$  ?

d - Calculer ces 2 chaleurs échangées.

e - en déduire l'expression du rendement

f - Quelles lois s'appliquent sur les transformations AB et CD ?

Exprimer  $T_B$  en fonction de  $T_A$  et  $\alpha$ .

Exprimer  $T_C$  en fonction de  $T_D$  et  $\alpha$ .

g - En déduire le rendement en fonction de  $\alpha$  seul.

# Influence du taux de compression ?

Exercice suivant à chercher :

ODG de la consommation :

phase d'accélération

$P = 100$  ch atteinte à 130Km/h pour 3000 Tr/min

(1 ch = 736 W)

Durée d'un tour

d'un cycle

$P =$

$W_{\text{cycle}} =$

$\eta_{\text{réel}} = 75\% \cdot \eta_{\text{th}} =$

$Q_{\text{explosion}} =$

$N_{\text{explosion}/100\text{km}} =$

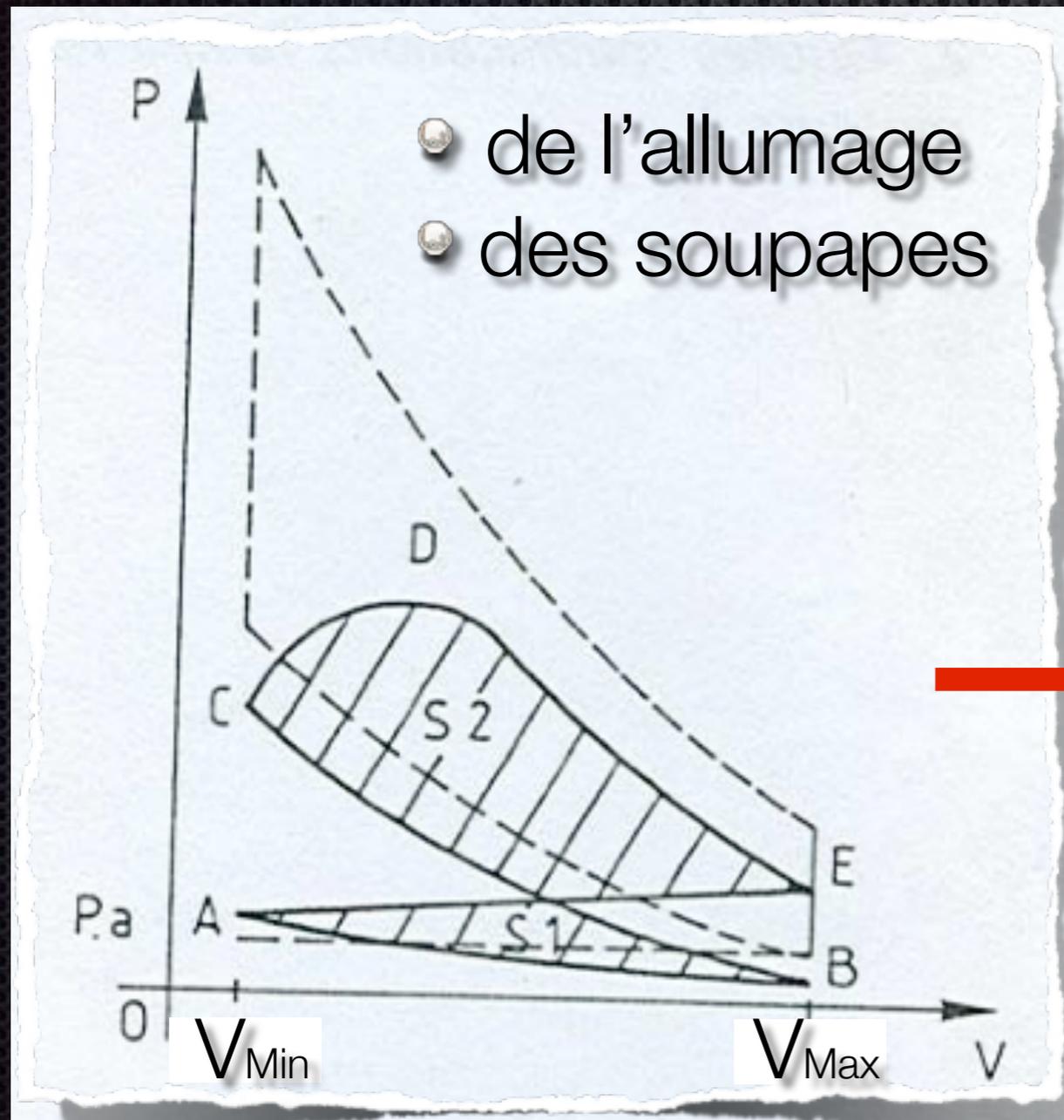
Donnée essence : 33 MJ / Litre

Consommation  $C =$

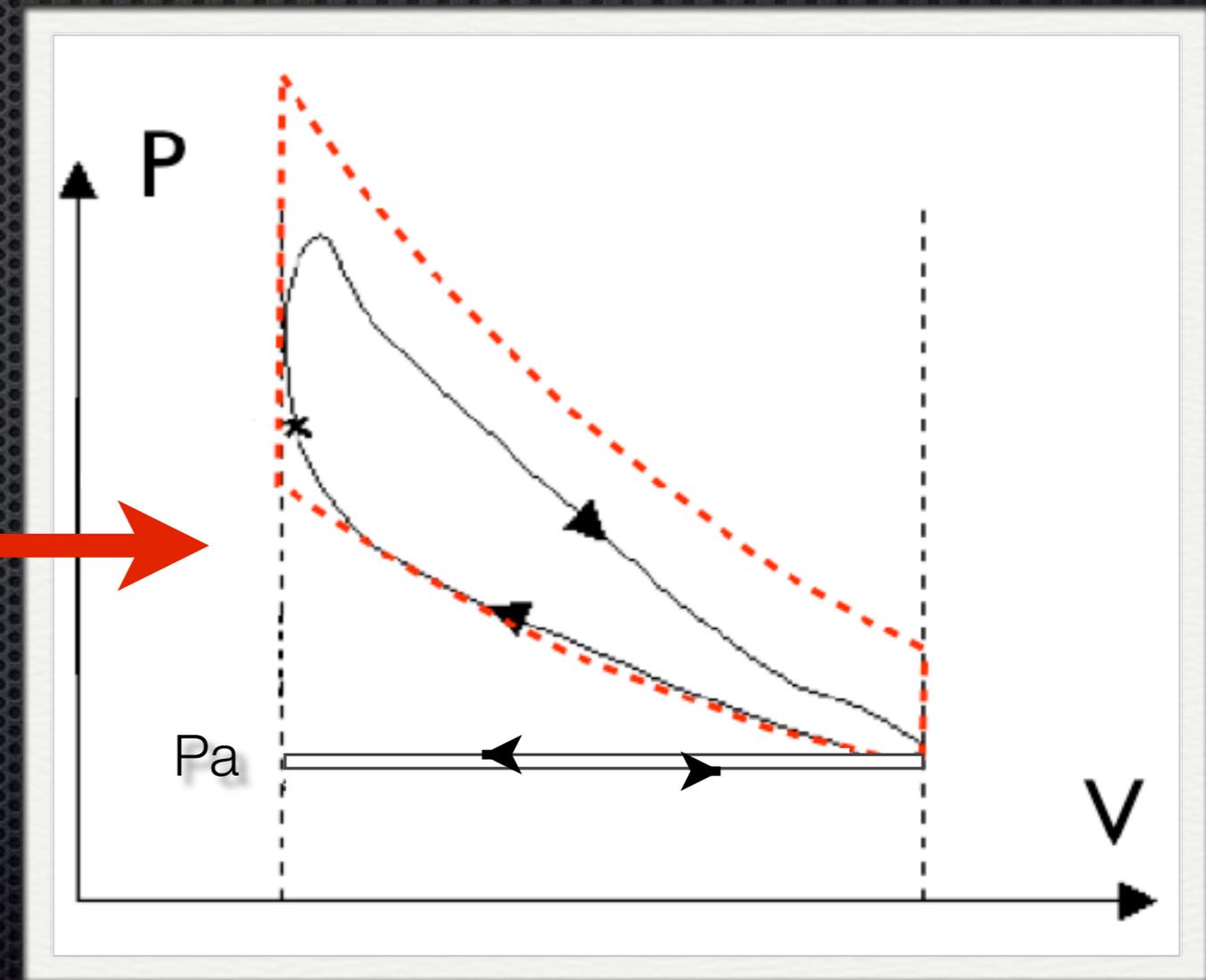
Litres aux 100km

# Le cycle moteur réel :

Mauvais réglage :



Bon réglage :



# Le cycle moteur réel :

En pratique on a toujours  
 $\eta < 35\%$

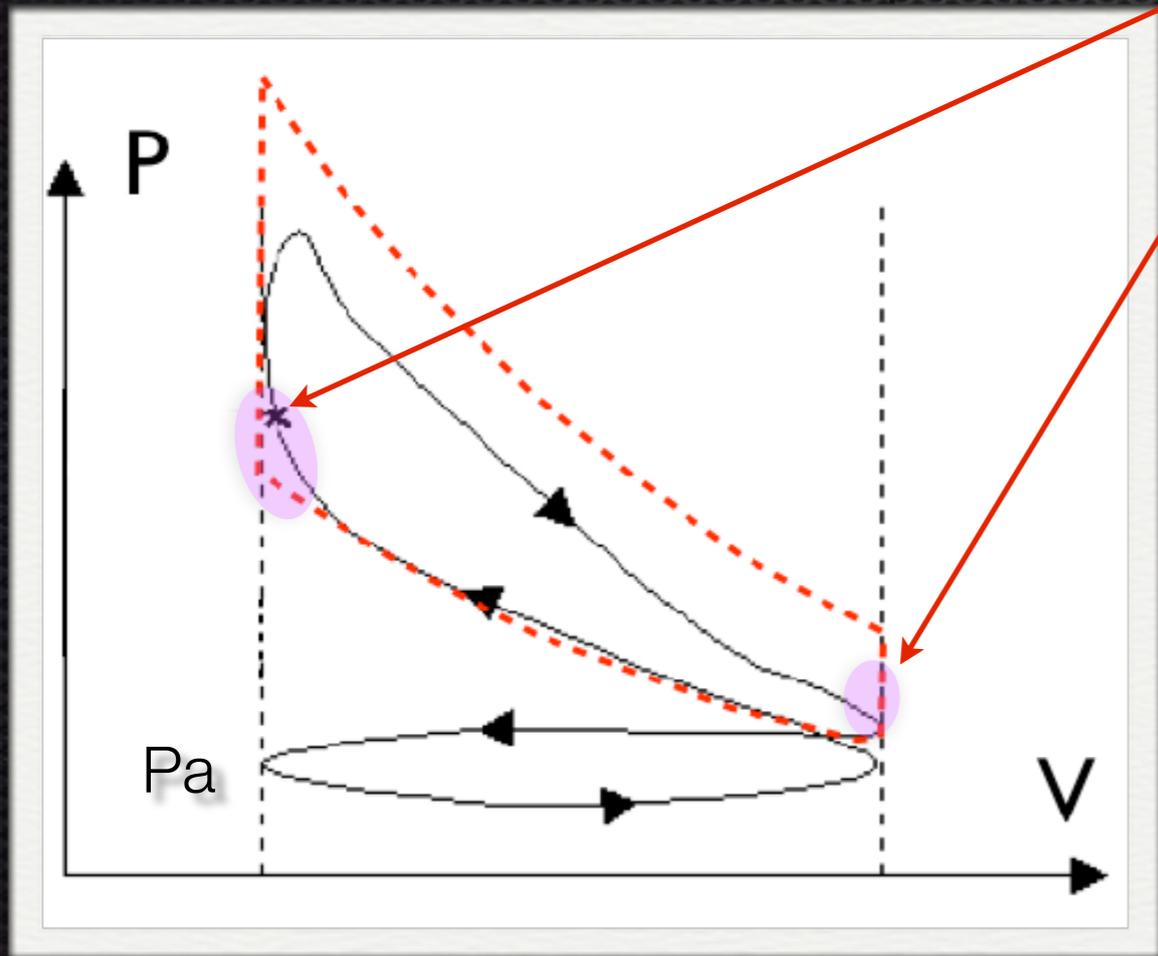
(  $\eta^{th} < 55\%$  )

Les isochores n'en sont pas  
tout à fait

Combustion incomplète  
On atteint pas  $P_{max}$

Pertes de chaleur par  
diffusion thermique

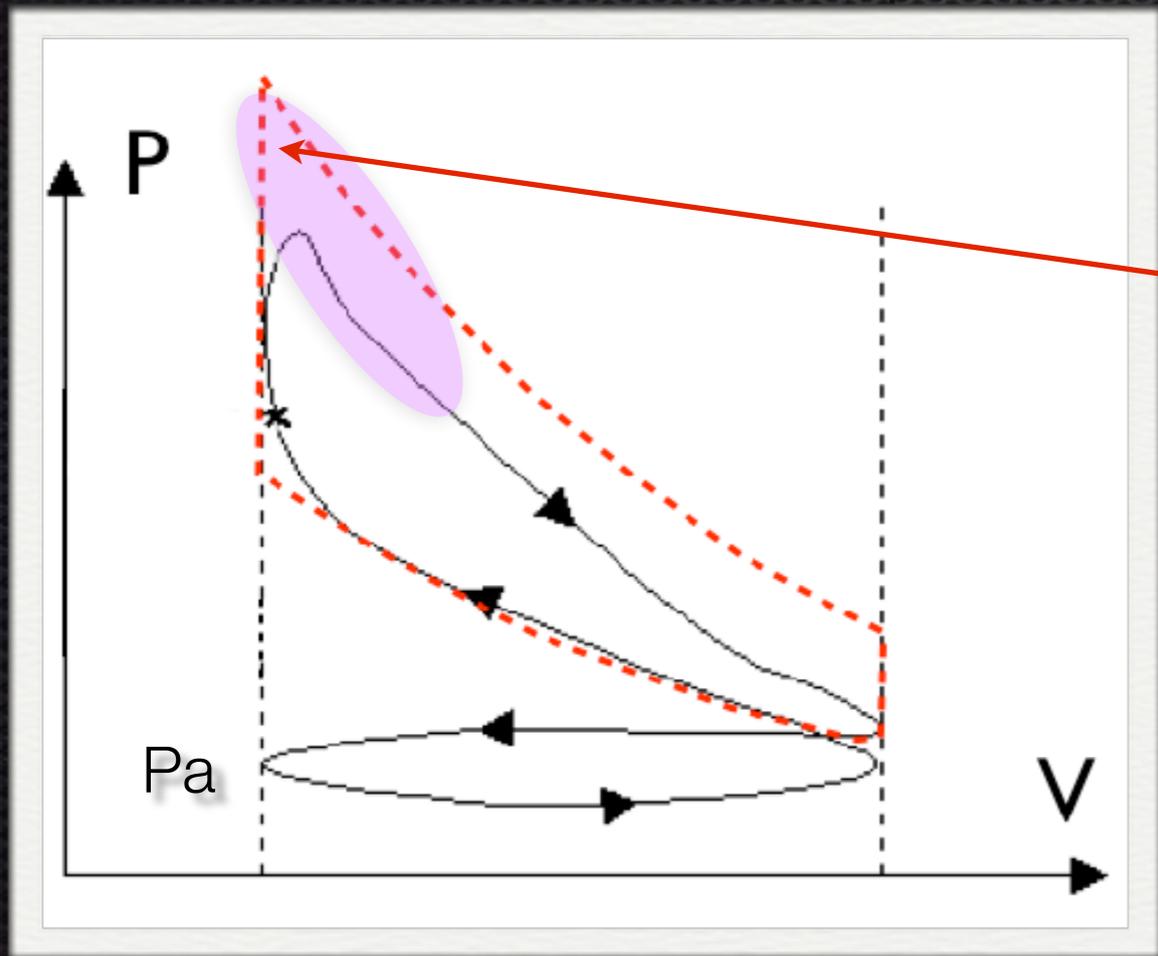
Cycle résistant  
Admission-échappement



# Le cycle moteur réel :

En pratique on a toujours  
 $\eta < 35\%$

(  $\eta^{th} < 64\%$  )



Les isochores n'en sont pas tout à fait

Combustion incomplète  
On atteint pas  $P_{max}$

Pertes de chaleur par diffusion thermique

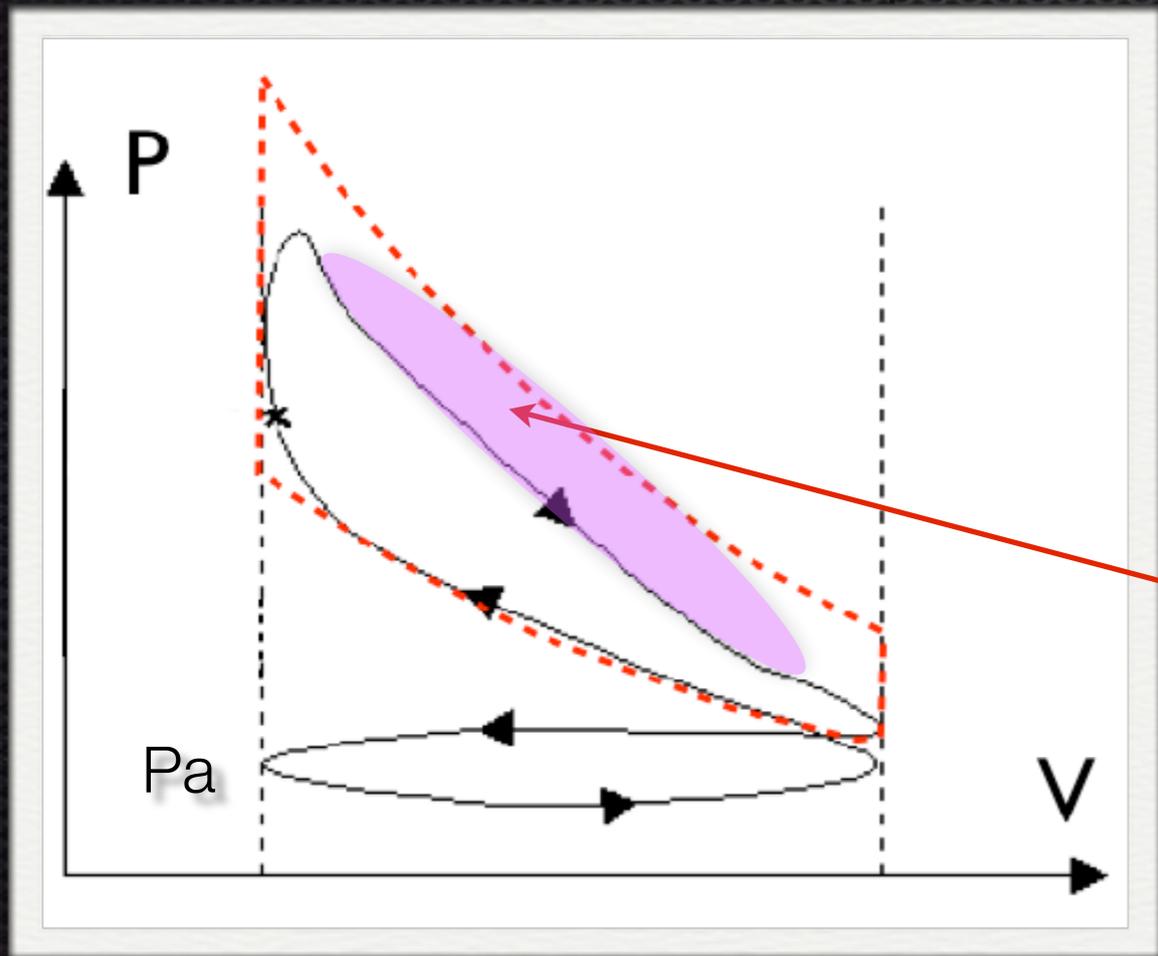
Cycle résistant  
Admission-échappement

# Le cycle moteur réel :

En pratique on a toujours

$$\eta < 35 \%$$

$$(\eta^{th} < 64\%)$$



Les isochores n'en sont pas tout à fait

Combustion incomplète  
On atteint pas Pmax

Pertes de chaleur par diffusion thermique

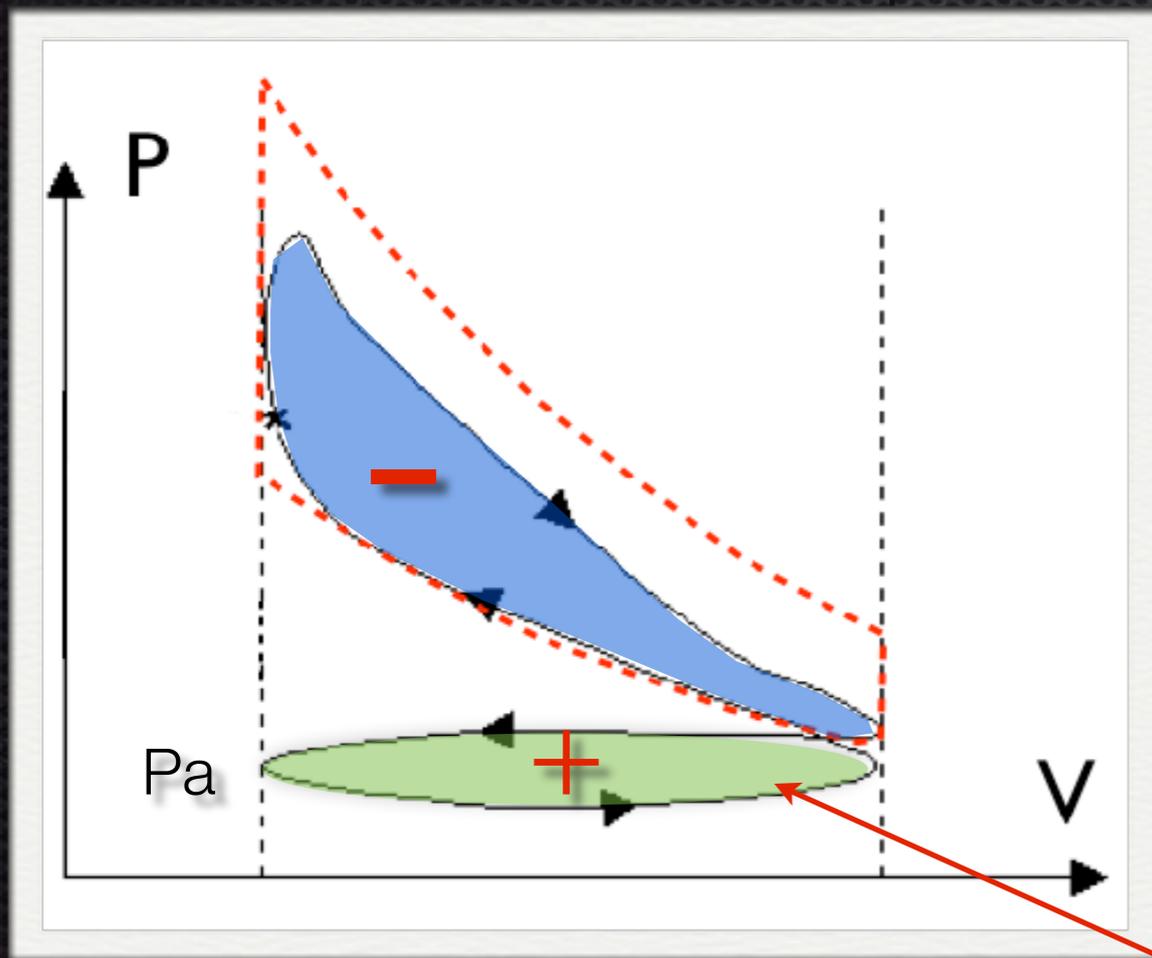
Cycle résistant  
Admission-échappement

# Le cycle moteur réel :

En pratique on a toujours

$$\eta < 35 \%$$

$$(\eta^{th} < 64\%)$$



Les isochores n'en sont pas tout à fait

Combustion incomplète  
On atteint pas  $P_{max}$

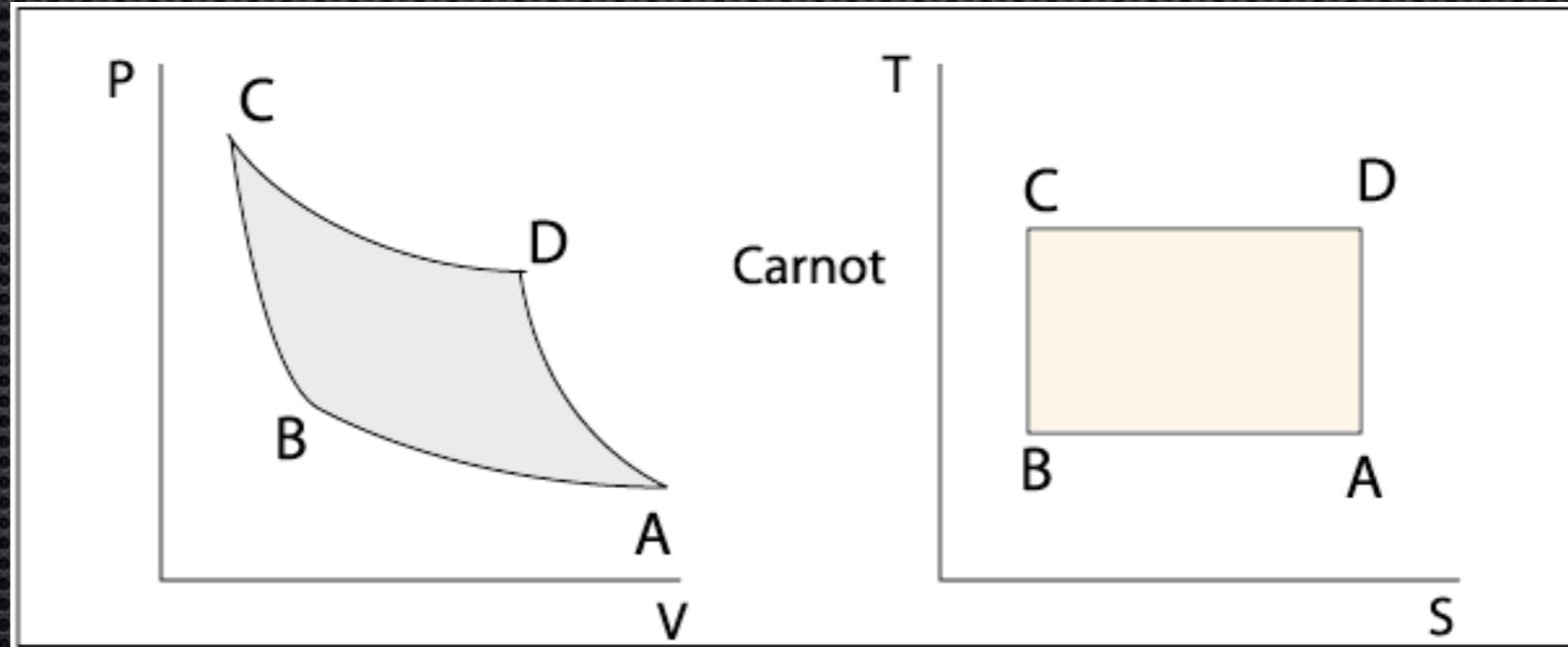
Pertes de chaleur par diffusion thermique

Cycle résistant  
Admission-échappement

# Les cycles moteurs courants

Cycle de Carnot

$$\eta = 1 - T_F / T_C$$

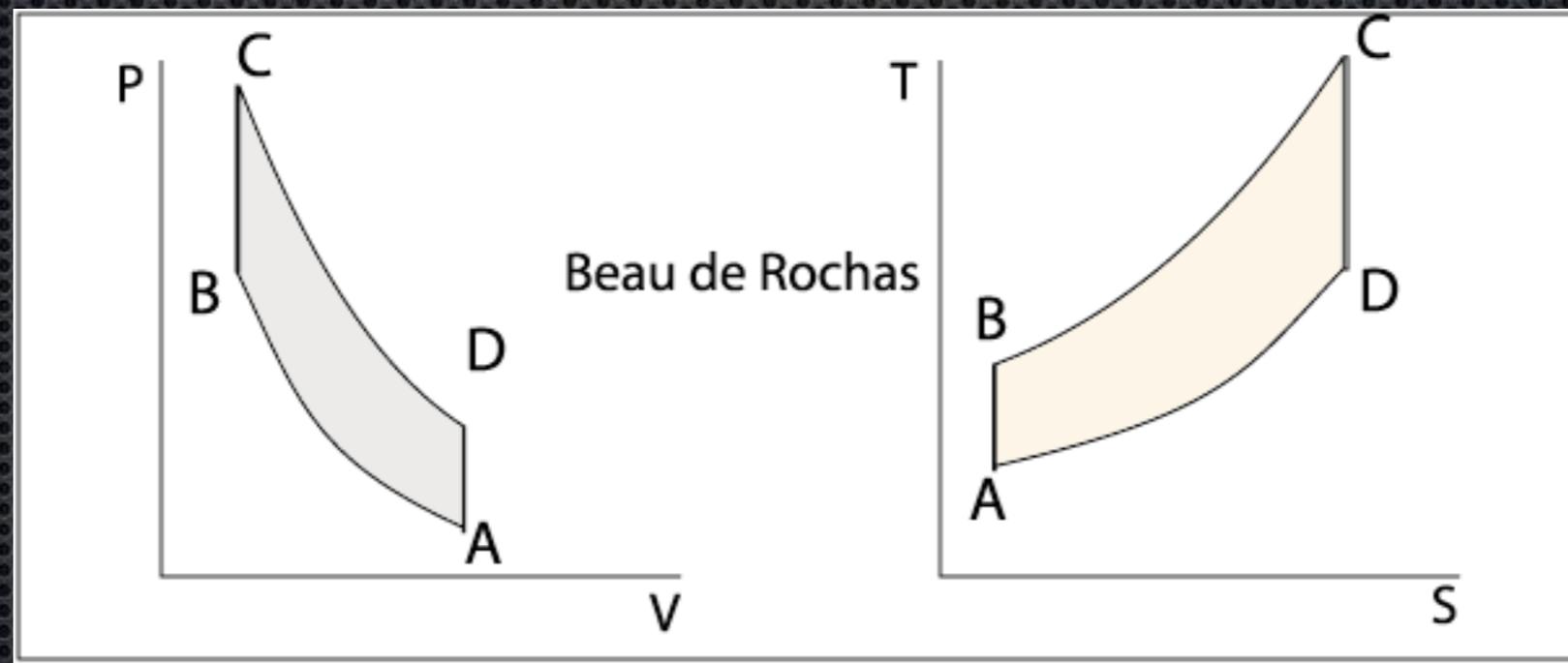


# Les cycles moteurs courants

Cycle de - Beau de Rochas (1862)  
- Otto (1876)

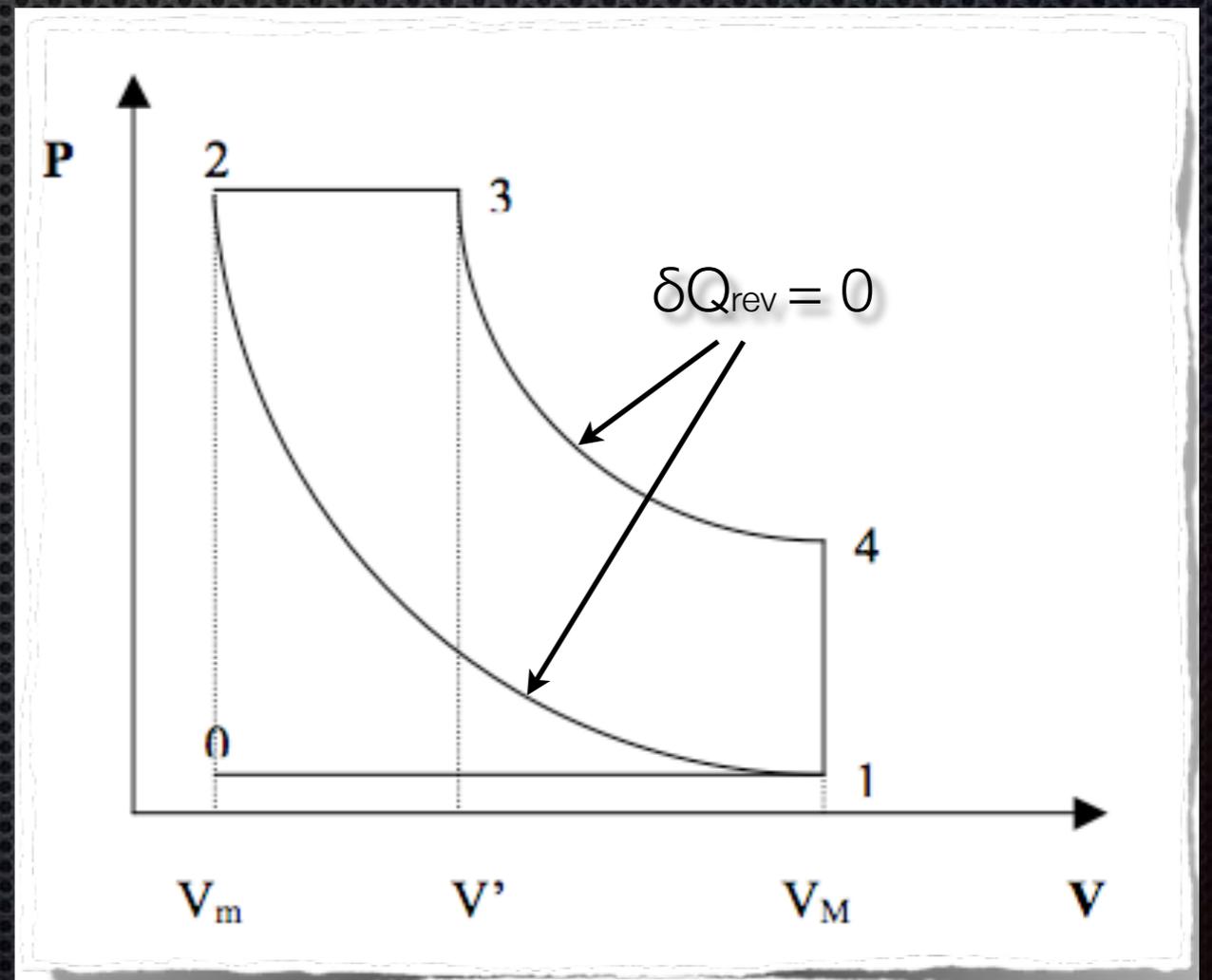
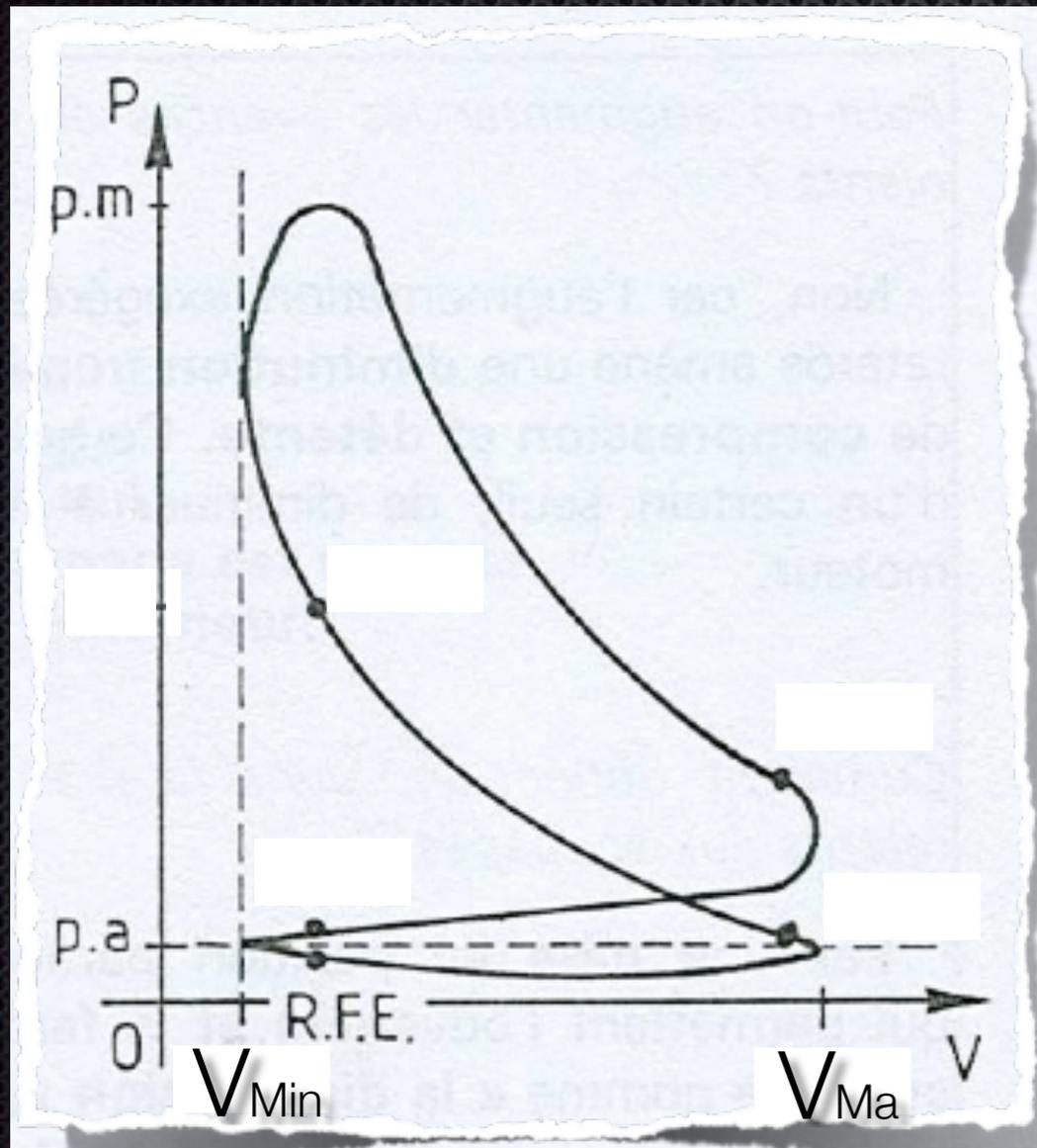
$$\eta = 1 - a^{1-\gamma}$$

$$a = V_{\max} / V_{\min}$$



# Les cycles moteurs courants

## Cycle Diesel (~1895)



# Les cycles moteurs courants

## Cycle de Joule-Brayton

