

Thermodynamique

Machines thermiques (*Révision*)

- 1) Introduction
- 2) Premiers énoncés du second principe
- 3) Systèmes monothermes
- 4) Systèmes dithermes
- 5) Cycles de Carnot
- 6) Quelques propriétés de la fonction entropie "S"

III.1) Introduction

Le premier principe

- ❖ permet uniquement, de faire des bilans d'échanges énergétiques.
- ❖ ne permet pas de prévoir le sens de l'évolution.
- ❖ ce sens ne peut être quelconque.

Le second principe de la thermodynamique, qu'on appelle encore, principe de Carnot, principe de l'entropie ou principe de l'évolution permet de montrer ce sens.

Exemple :

Le transfert de chaleur d'un corps chaud à un corps froid peut se faire spontanément, alors que le transfert de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud se fait avec consommation de l'énergie (par intervention de l'extérieur).

III.2) Premiers énoncés du second principe de la thermodynamique

III.2.1) Énoncé de Clausius

❖ 1ère forme de l'énoncé :

"La chaleur ne passe pas d'elle même d'un corps froid à un corps chaud sans modification simultanée de l'extérieur".

❖ 2ème forme de l'énoncé:

"Il est impossible de réaliser une machine thermique qui, au cours d'un cycle de transformations, transporterait de la chaleur d'une source froide vers une source chaude sans travail extérieur".

III.2.2) Énoncé de L. Kelvin (Planck)

"Un cycle monotherme ne peut pas fournir du travail"

Monotherme : système qui n'échange de la chaleur qu'avec une seule source de chaleur, de température bien définie.

Source : corps de capacité calorifique infiniment grande. Tout échange ne modifie guère sa température. (source naturelle, artificielle)

$$\Delta U_{\text{cycle monoth}} = Q + W \Rightarrow W = -Q$$

- $W > 0$ et $Q < 0 \Rightarrow$ syst. consomme W et fournit Q ← possible
- $W < 0$ et $Q > 0 \Rightarrow$ syst. fournit W et consomme Q ← impossible

Exemples:

- ❖ Agitateur plongé dans de l'eau chaude ne tourne pas.
- ❖ Résistance électrique qu'on chauffe ne fournit pas de l'électricité
- ❖ Bateau qui puise de la chaleur de l'océan pour avancer n'existe pas.

III.3) Systèmes monothermes

III.3.1) Cycle monotherme réversible

$$1^{er} \text{ Principe : } \Delta U_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} = 0$$

$$2^{ème} \text{ Principe : } \begin{cases} W_{\text{cycle}} \geq 0 \\ Q_{\text{cycle}} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{d'après Kelvin})$$

Si le cycle est décrit dans le sens inverse, on aura : $W \leq 0$, ce qui est impossible d'après le 2ème principe, on a alors, $W = 0$ et par suite $Q = 0$.

Cycle monotherme rév. \rightarrow

$$\begin{cases} W_{\text{cycle}} = 0 \\ Q_{\text{cycle}} = 0 \end{cases}$$

III.3.2) Cycle monotherme irréversible

$$W \geq 0 \text{ (d'après Kelvin)} \quad \Leftrightarrow \quad Q \leq 0$$

\Rightarrow *Cycle irréversible : consomme W et fournit Q*

Le cycle monotherme irréversible est donc, nécessairement un cycle récepteur.



III.4) Systèmes dithermes

III.4.1) Cycle ditherme

Déf. C'est un cycle au cours duquel le système échange de la chaleur avec deux sources distinctes, l'une chaude (S.C.) à la température T_C et l'autre froide (S.F.) à la température $T_F < T_C$.

$$\Delta U_{\text{cy dith.}} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad W_{\text{cy. dith}} = -(Q_C + Q_F)$$

Q_C et Q_F sont les chaleurs échangées respectivement, avec la source chaude et la source froide.

III.4.2) Cycles dithermes moteurs

Déf. C'est un cycle qui sert à produire du travail : $W_{cy.} < 0$.

$$W_{cy.} = -(Q_C + Q_F) \quad \Leftrightarrow \quad Q_C + Q_F > 0$$

Trois cas se présentent:

$$Q_C + Q_F > 0 \quad \Leftrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_C < 0 \text{ et } Q_F > 0 \text{ avec } Q_F > |Q_C| \quad \uparrow \quad (a) \\ Q_C > 0 \text{ et } Q_F > 0 \quad \uparrow \quad (b) \\ Q_C > 0 \text{ et } Q_F < 0 \text{ avec } Q_C > |Q_F| \quad \uparrow \quad (c) \end{array} \right.$$

□ Cas (c): possible

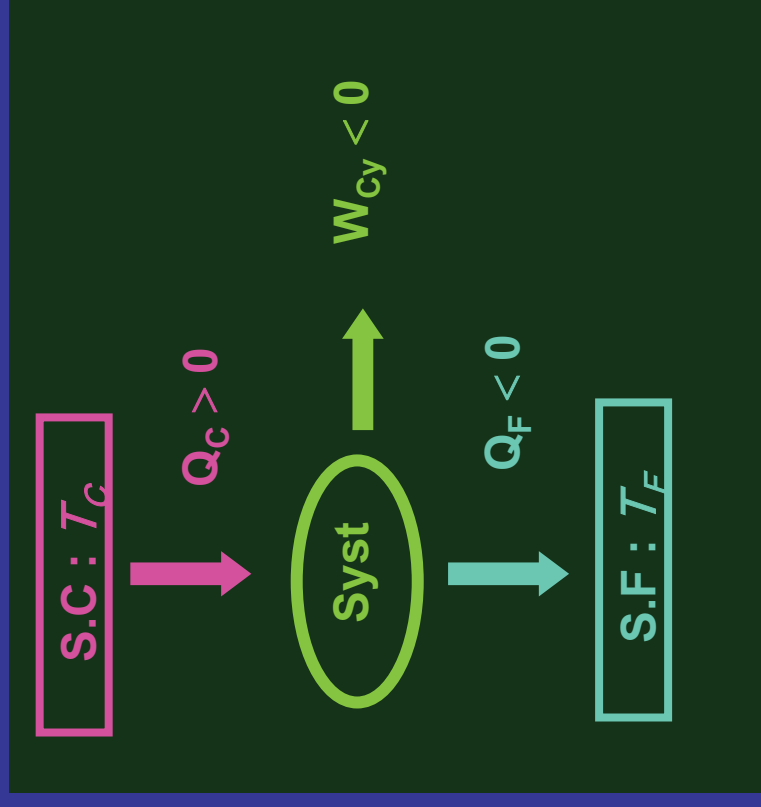
C'est la machine thermique motrice (moteur). Elle fournit du travail au milieu extérieur en transformant une partie de Q_C en W et en cédant le reste à la source froide $S.F.$ soit:

$$Q_F = -(Q_C + W_{cy}) < 0.$$

Nécessairement, on a :

$$|Q_F| < Q_C$$

avec W_{cy} qui représente les recettes en énergie, Q_C les dépenses et Q_F les pertes.



III.4.2.2) Rendement d'un cycle ditherme moteur

Déf. : le rendement, \mathfrak{R} , d'un cycle moteur ditherme est défini par:

$$\mathfrak{R} = -\frac{W_{cy}}{Q_C} \rightarrow \begin{array}{l} \text{recettes en énergie} \\ \text{dépendes en énergie} \end{array} \quad \mathfrak{R} > 0 \text{ d' où le signe } -$$

Autre expression :

$$\mathfrak{R} = -\frac{W_{cy}}{Q_C} = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

or $\begin{cases} |Q_F| < Q_C \\ Q_F < 0 \end{cases} \Rightarrow 0 < \mathfrak{R} < 1$

Le rendement calculé lors d'un cycle moteur ditherme est compris entre 0 et 1.

Exemples :

❖ Véhicule motorisé :



❖ Centrale thermique :



III.4.3) Cycles dithermes récepteurs

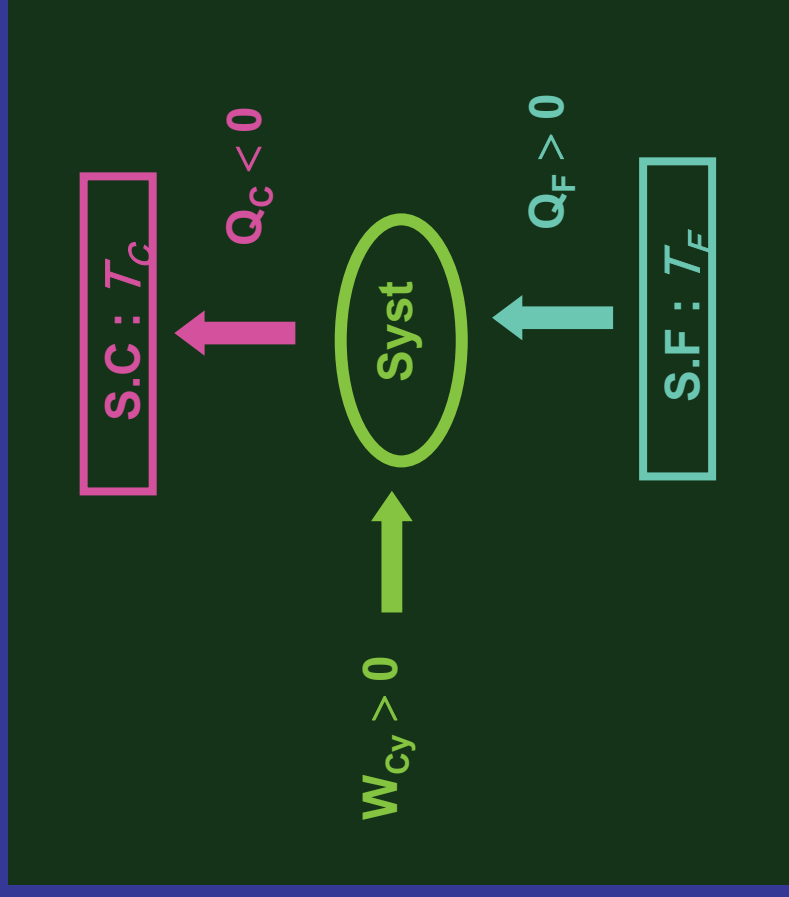
Définition : le cycle ditherme récepteur est un cycle où le système reçoit du travail de l'extérieur.

$$\text{On a alors : } W_{cy} > 0 \quad \Rightarrow \quad Q_F + Q_C < 0.$$

Soient trois cas à envisager :

$$Q_C + Q_F < 0 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_C > 0 \text{ et } Q_F < 0 \text{ avec } |Q_F| > Q_C \quad \uparrow \quad (a) \\ Q_C < 0 \text{ et } Q_F < 0 \quad \uparrow \quad (b) \\ Q_C < 0 \text{ et } Q_F > 0 \text{ avec } |Q_C| > Q_F \quad \uparrow \quad (c) \end{array} \right.$$

❖ Cas (c) :



C'est le cas qui nous intéresse. $|Q_C| > |Q_F|$, le système reçoit du travail $W_{cy} > 0$, extrait la chaleur Q_F de la source S.F et rejette $Q_C = -(W_{cy} + Q_F)$ dans S.C. Le deuxième principe est vérifié.

Un tel système peut servir soit, dans la réfrigération, soit dans le chauffage.

III.4.3.2) Le réfrigérateur et son efficacité

Déf. : le but d'une machine frigorifique est la production du froid (refroidir).

Exemple : *le réfrigérateur*

S.F. : intérieur du réfrigérateur (armoire)

S.C. : air ambiant (cuisine)

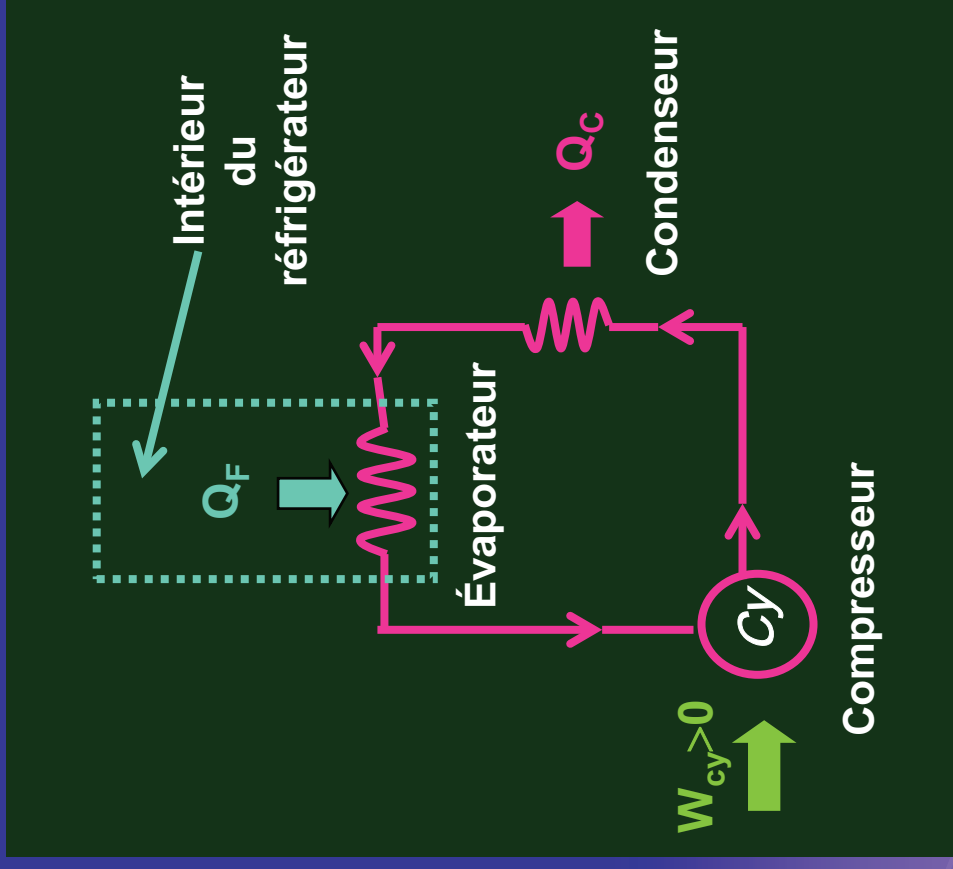
W_{cy} : énergie électrique fournie au compresseur pour extraire Q_F .

Fluide caloporteur : fréon (en général), (nom commercial des composés CFC ou chlorofluorocarbures).

Coefficient d'efficacité du réfrigérateur :

$$e_f = \frac{Q_F}{W_{cy}}$$

→ *recettes* → *dépenses*



L'efficacité " e_f " peut être supérieure, inférieure ou égale à 1.

III.4.3.3) Pompe à chaleur (en abrégé: PAC)

Déf.: C'est une machine réceptrice dont le but est de chauffer ou de maintenir chaud un local.

S.C.:: local à chauffer

S.F.:: eau d'un lac (ou d'un puits), ou l'atmosphère

Il existe quatre types de pompe à chaleur :

- ❖ PAC **air-air** : c'est la plus répandue car l'air est par tout.
- ❖ PAC **eau-eau**
- ❖ PAC **air-eau**: exemple: chauffer l'eau d'une piscine en extrayant Q_F de l'air.
- ❖ PAC **eau-air**: exemple: chauffer l'air d'une habitation en pompant Q_F d'un puits.

(Signification de la notation: PAC **s.f** - **s.c**. (Exemple pour la pompe à chaleur: PAC **eau** – **air**, l'eau est la source froide **S.F**. et l'air est la source chaude **S.C.**, dans cet ordre)).

❖ Coefficient de performance d'une pompe à chaleur

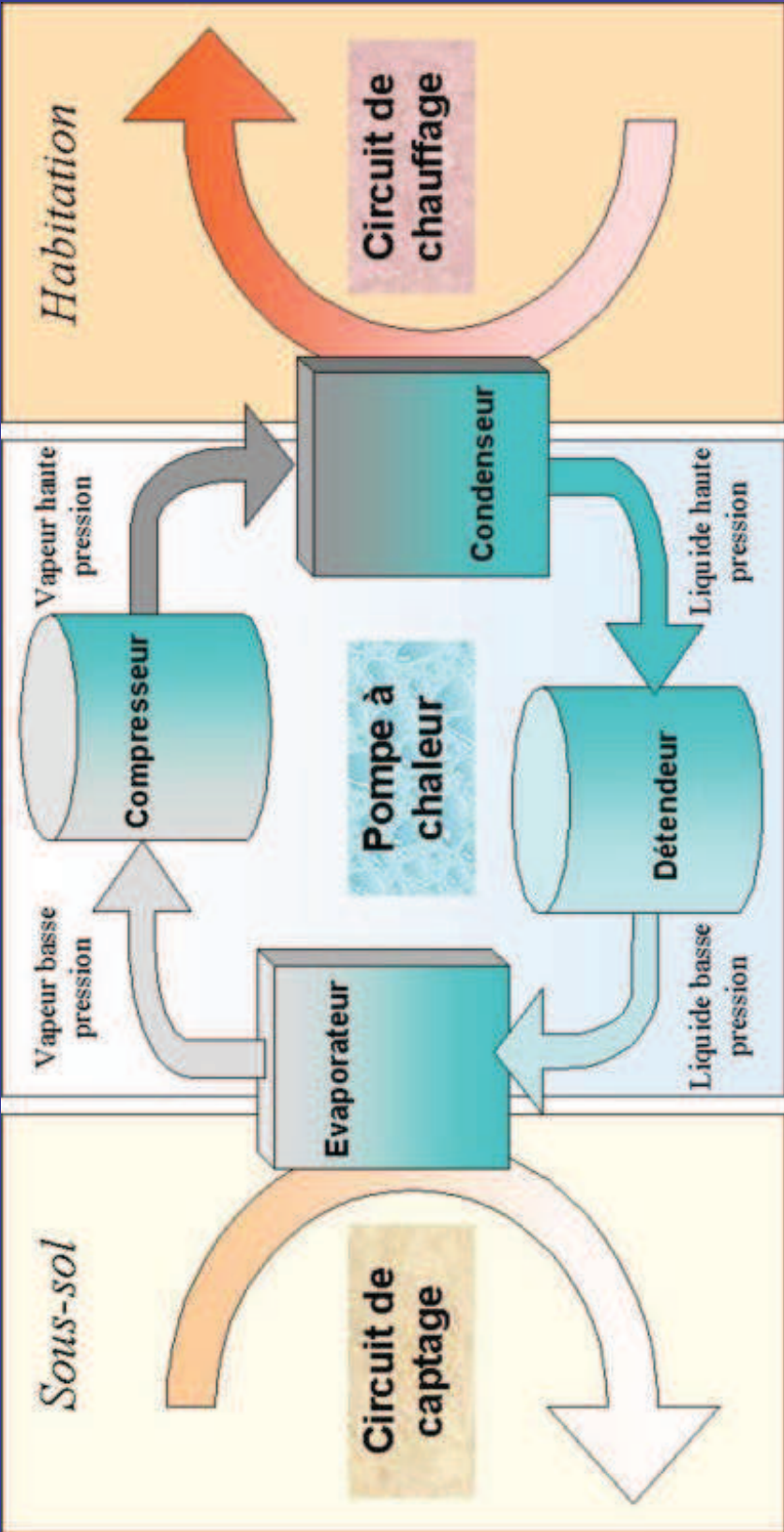
$$e_p = \frac{Q_c}{W_{cy}}$$

↑ *recettes (car but : chauffer)*
↑ *dépenses*

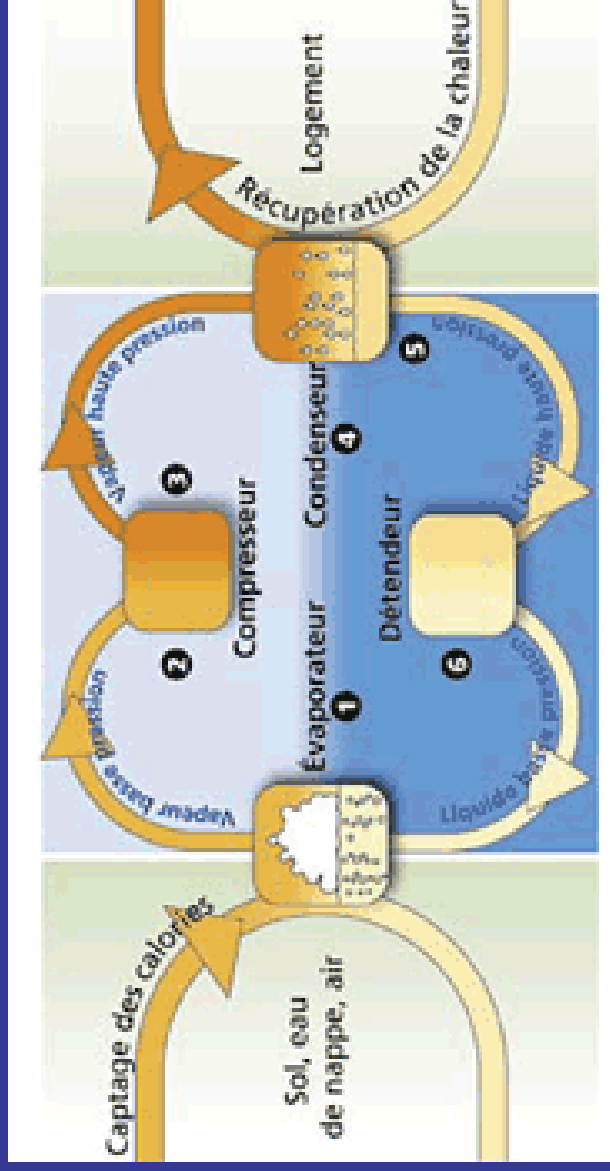
Soit encore:

$$e_p = \frac{Q_c}{Q_c + Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_c}}$$

$$|Q_c| > Q_F \Rightarrow -1 < \frac{Q_F}{Q_c} < 0 \Rightarrow e_p > 1$$



Annexe3: Schéma de principe de la pompe à chaleur



1 : la chaleur prélevée à l'extérieur est transférée au fluide frigorigère qui se vaporise.

2 : le compresseur électrique aspire le fluide frigorigère vaporisé.

3 : la compression élève la température du fluide frigorigère.

4 : le fluide frigorigère cède sa chaleur à l'eau du circuit de chauffage ou directement à l'air du lieu à chauffer.

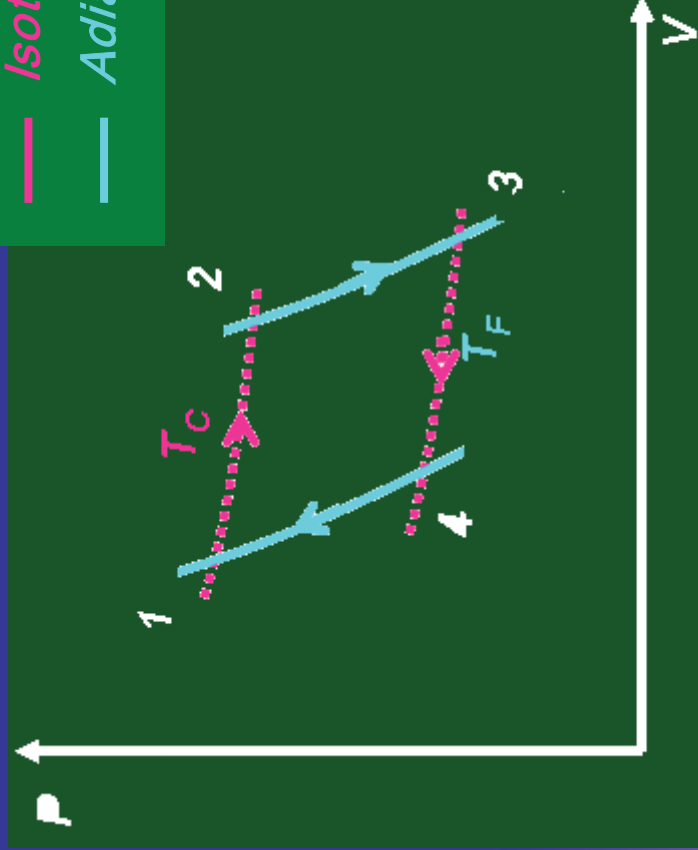
5 : le fluide frigorigère se condense et revient à l'état liquide.

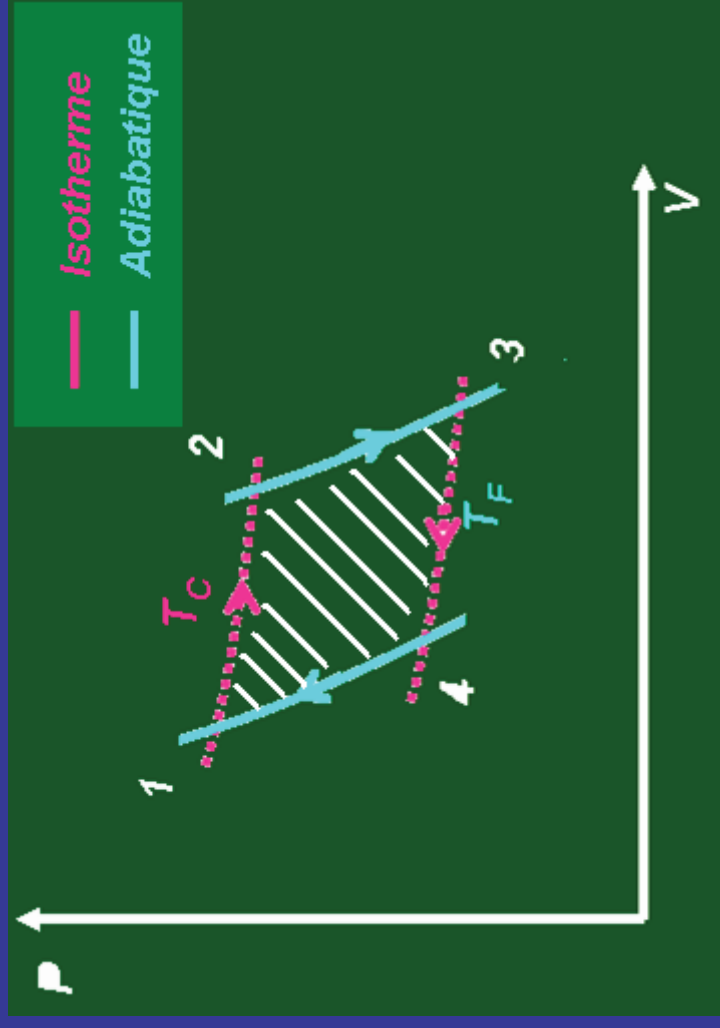
6 : le détendeur abaisse la pression du liquide frigorigère qui amorce ainsi sa vaporisation.

III.5 Cycle de Carnot

Déf : le cycle de Carnot est un cycle ditherme réversible, constitué de deux isothermes et deux adiabatiques.

T_F : température de la S.F
 T_C : température de la S.C
 \mathfrak{S}_{12} : isotherme T_C
 \mathfrak{S}_{34} : isotherme T_F
 \mathfrak{S}_{23} : adiabatique
 \mathfrak{S}_{41} : adiabatique





$Q_{12} = Q_C$ → échangée avec la S.C à T_C

$Q_{34} = Q_F$ → échangée avec la S.F à T_F

$Q_{23} = Q_{41} = 0$

W_{cy} → travail échangé au cours du cycle

□ Le premier principe s'écrit :

$$\Delta U_{\text{cy}} = 0 \Leftrightarrow W_{\text{cy}} + Q_C + Q_F = 0$$

□ D'autre part, la variation de l'entropie pour ce cycle réversible est nulle :

$$\Delta S_{\text{cy}} = 0 \Leftrightarrow \oint_{\text{cy}} dS = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{Q_C}{T_C} + 0 + \frac{Q_F}{T_F} + 0 = 0$$

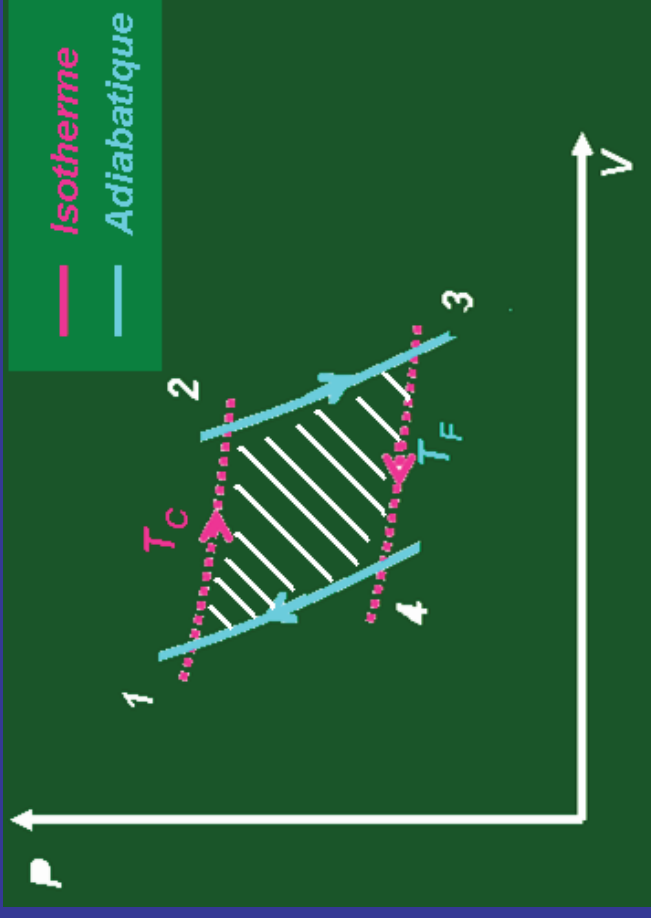
$$\left(\int_{23} \frac{\delta Q}{T} = \int_{41} \frac{\delta Q}{T} = 0 \text{ car } S_{23} \text{ et } S_{41} \text{ adiab.} \right)$$

$$\int_{12} \frac{\delta Q}{T_C} + \int_{23} \frac{\delta Q}{T} + \int_{34} \frac{\delta Q}{T_F} + \int_{41} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

En résumé Cy Carnot :

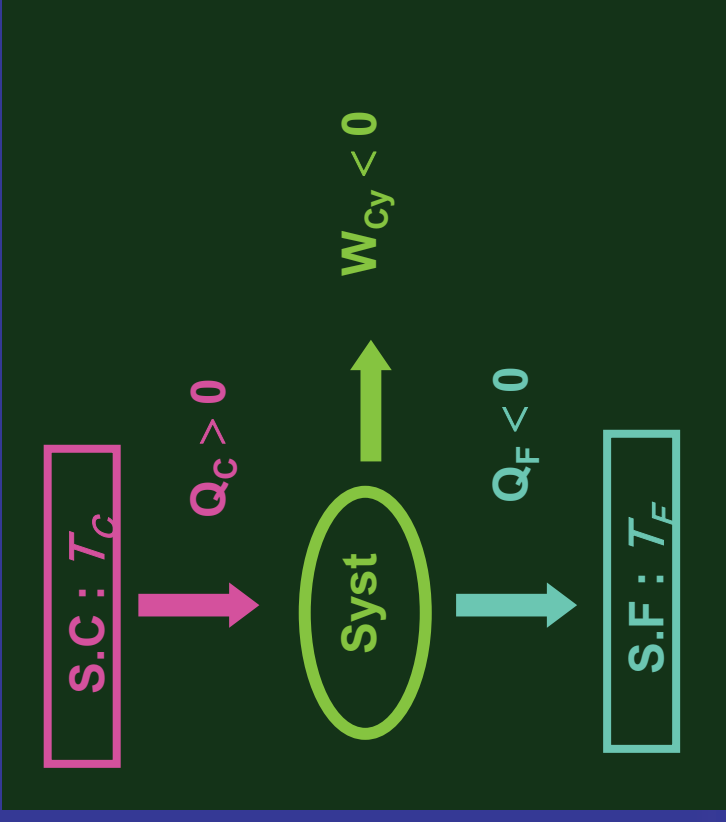
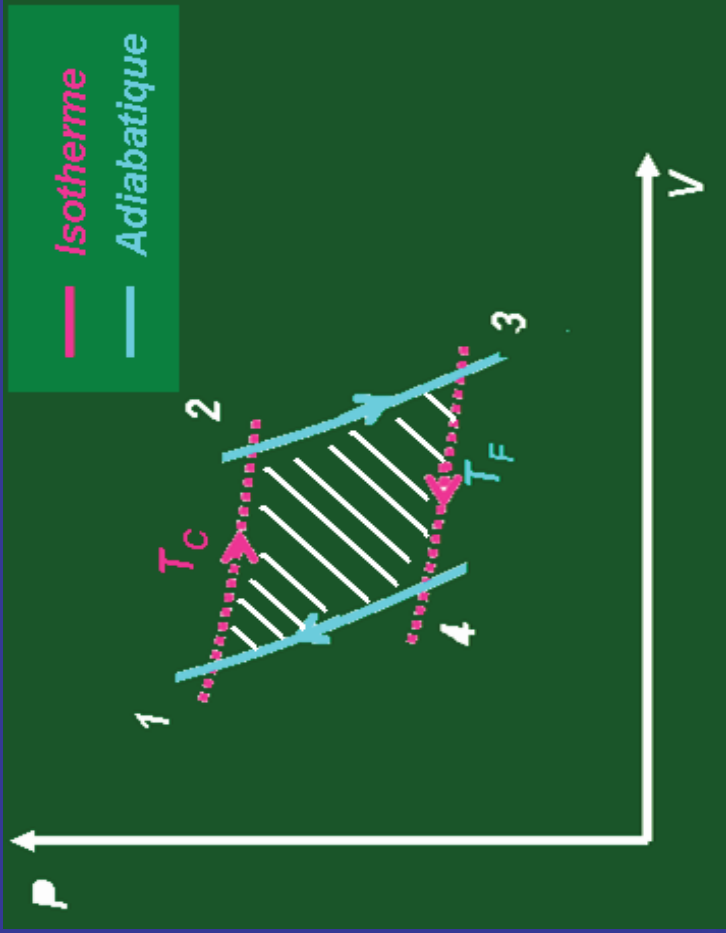
$$W_{\text{cy}} = -(Q_C + Q_F)$$

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



III.5.2) Cycle moteur de Carnot

□ But : produire du travail W d'une manière réversible.



□ Rendement du cycle moteur de Carnot:

$$\mathfrak{R}_{Carnot} = -\frac{W_{cy}}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

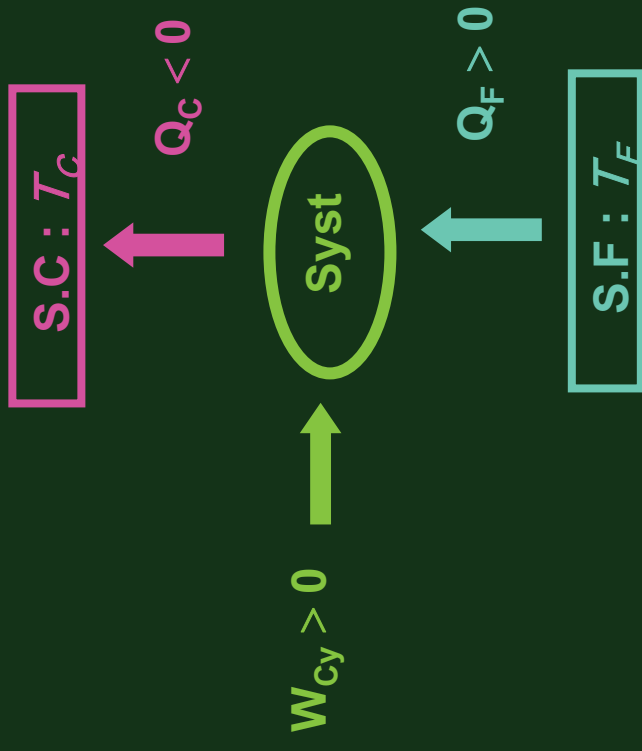
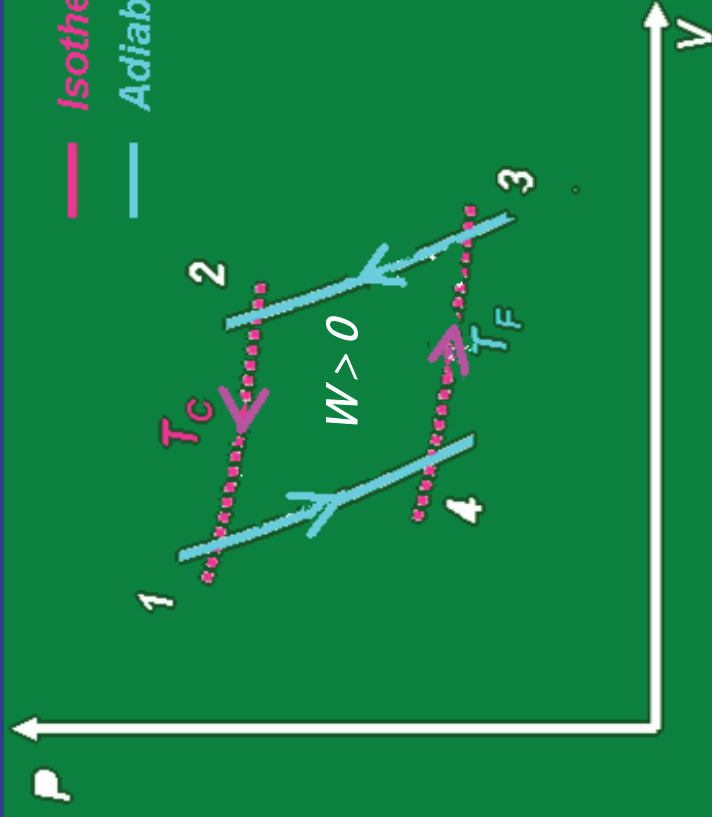
$$\mathfrak{R}_{Carnot} = \frac{T_C - T_F}{T_C} < 1$$

moteur plus performant, l'écart ($T_C - T_F$) doit être le plus grand possible.

III.5.3) Cycle récepteur réversible de Carnot

❖ But : refroidir

(Exemples: réfrigérateur, climatiseur, congélateur...ect.)



❖ Efficacité d'un récepteur réversible de Carnot
(machine à produire du froid) :

$$e_f = \frac{Q_F}{W_{cy}} = \frac{Q_F}{-Q_F - Q_C} = \frac{1}{-1 - \frac{Q_C}{Q_F}} = \frac{1}{-1 + \frac{T_C}{T_F}}$$

Soit encore :

$$e_f = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

- ❑ Plus l'écart ($T_C - T_F$) est petit, mieux est l'efficacité e_f
- ❑ En général on a : $(e_f)_{réel.} = (e_f)_{irrév.} < \frac{(e_f)_{rév.}}{2}$

III.5.3.2) But: Chauffer

Exemples : Pompe à chaleur réversible (PAC rév.)

□ Coefficient de performance e_p :

$$e_p = \frac{Q_C}{W_{cy}} = -\frac{Q_C}{-Q_C - Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}}$$

Soit encore :

$$e_p = \frac{T_C}{T_C - T_F} > 1$$

- ❖ (e_p) donnée par les fabricants ≈ 8 .
- ❖ (e_p) réel ≈ 4 au mieux.
- ❖ Exemple de PAC rév. : $t_C = 27^\circ \text{C}$ et $t_F = 7^\circ \text{C}$. on a $(e_p)_{\text{rév}} \approx 15$.

III.5.4) Théorème de Carnot

□ Énoncé du Théorème

$\mathcal{R}_{\text{irrév.}} \prec \mathcal{R}_{\text{rév.}}$ → 2 moteurs

$e_f^{\text{irrév.}} \prec e_f^{\text{rév.}}$ → 2 machines à froid

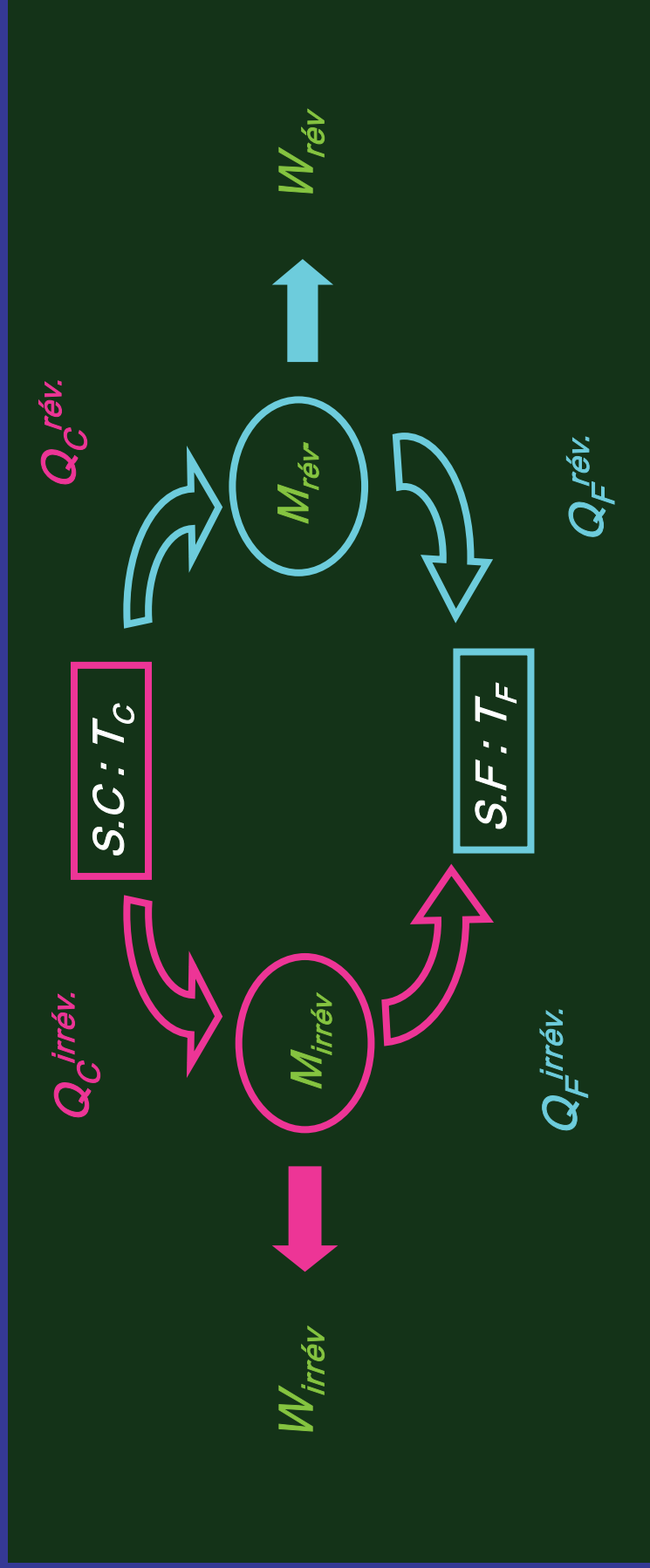
$e_p^{\text{irrév.}} \prec e_p^{\text{rév.}}$ → 2 PAC

□ Corollaire :

Deux machines réversibles fonctionnant entre mêmes températures ont mêmes rendements

$$\mathcal{R}_{\text{rév.}} = \mathcal{R}'_{\text{rév.}}$$

III.5.4.2) Inégalité de Clausius



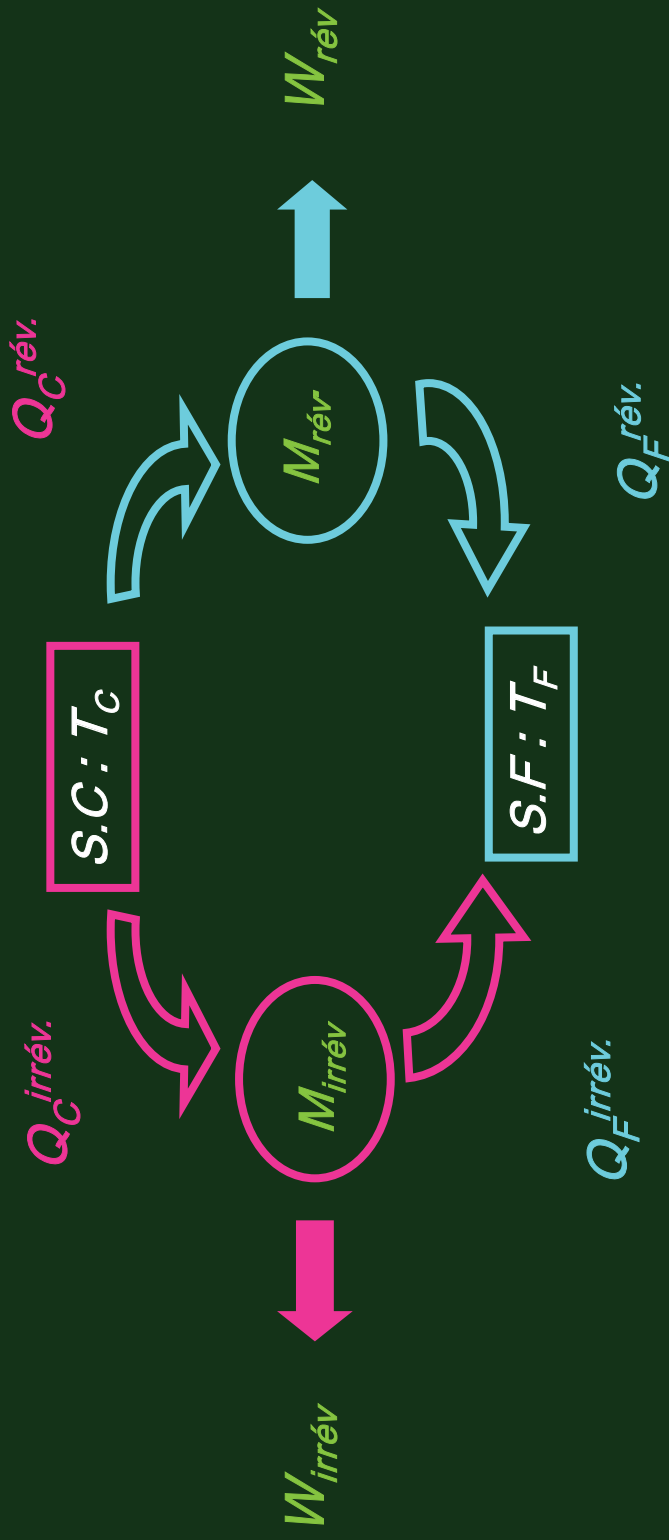
Théorème de Carnot : $\mathfrak{R}^{irrév} \prec \mathfrak{R}^{rév}$

$$\Leftrightarrow \frac{Q_C^{irrév} + Q_F^{irrév}}{Q_C^{irrév}} \prec \frac{T_C - T_F}{T_C}$$

$$\Leftrightarrow 1 + \frac{Q_F^{irrév}}{Q_C^{irrév}} \prec 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

$$\Leftrightarrow \frac{Q_F^{irrév}}{T_F} + \frac{Q_C^{irrév}}{T_C} \prec 0$$

En résumé :



$$\text{cycle } rév. \rightarrow \frac{Q_C^{rév.}}{T_C} + \frac{Q_F^{rév.}}{T_F} = 0$$

$$\text{cycle } irrév. \rightarrow \frac{Q_C^{irrév.}}{T_C} + \frac{Q_F^{irrév.}}{T_F} < 0$$

$$\Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq \frac{Q_C^{irrév.}}{T_C} + \frac{Q_F^{irrév.}}{T_F} \\ \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq \frac{Q_C^{irrév.}}{T_C} + \frac{Q_F^{irrév.}}{T_F} \leq 0 \end{array} \right\}$$