

Analyse Exergétique et Irréversibilités



Prof. Riad BENELMIR

Nancy Université - Univ. Henri Poincaré

LERMAB - Equipe Energétique et Procédés

Faculté des Sciences et Techniques - Campus Victor Grignard B.P. 239

54506 Vandoeuvre-Les-Nancy Cedex

E-mail : benelmir@lermab.uhp-nancy.fr

Sommaire

- « Exergie ⇔ Irréversibilités ⇔ Travail » pour les Machines
- « Exergie ⇔ Irréversibilités » pour les échangeurs de chaleur

Exergie \Leftrightarrow Irréversibilités \Leftrightarrow Travail pour les Machines

□ Pour les machines directes :

Irréversibilités \Leftrightarrow écart entre le travail actuel fourni et le travail maximum

Travail maximum \Leftrightarrow Exergie thermique de la source chaude

□ Pour les machines inverses :

Irréversibilités \Leftrightarrow écart entre le travail actuel absorbé et le travail minimum

Travail minimum \Leftrightarrow Exergie thermique du réservoir froid pour les MF

Travail minimum \Leftrightarrow Exergie thermique du réservoir chaud pour les PAC

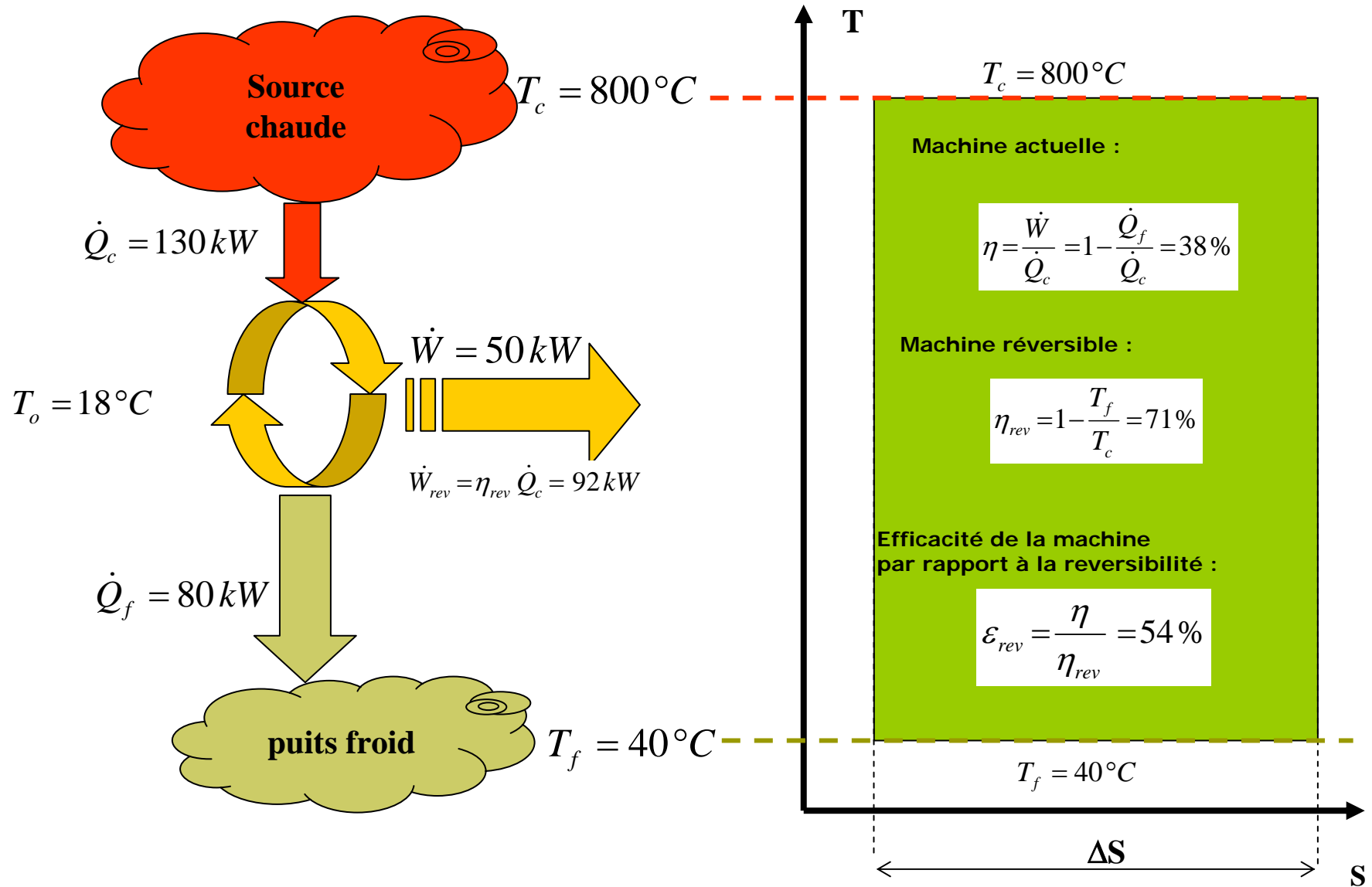
Exergie \Leftrightarrow Irréversibilités pour le transfert de chaleur

□ Indicateur exergetique

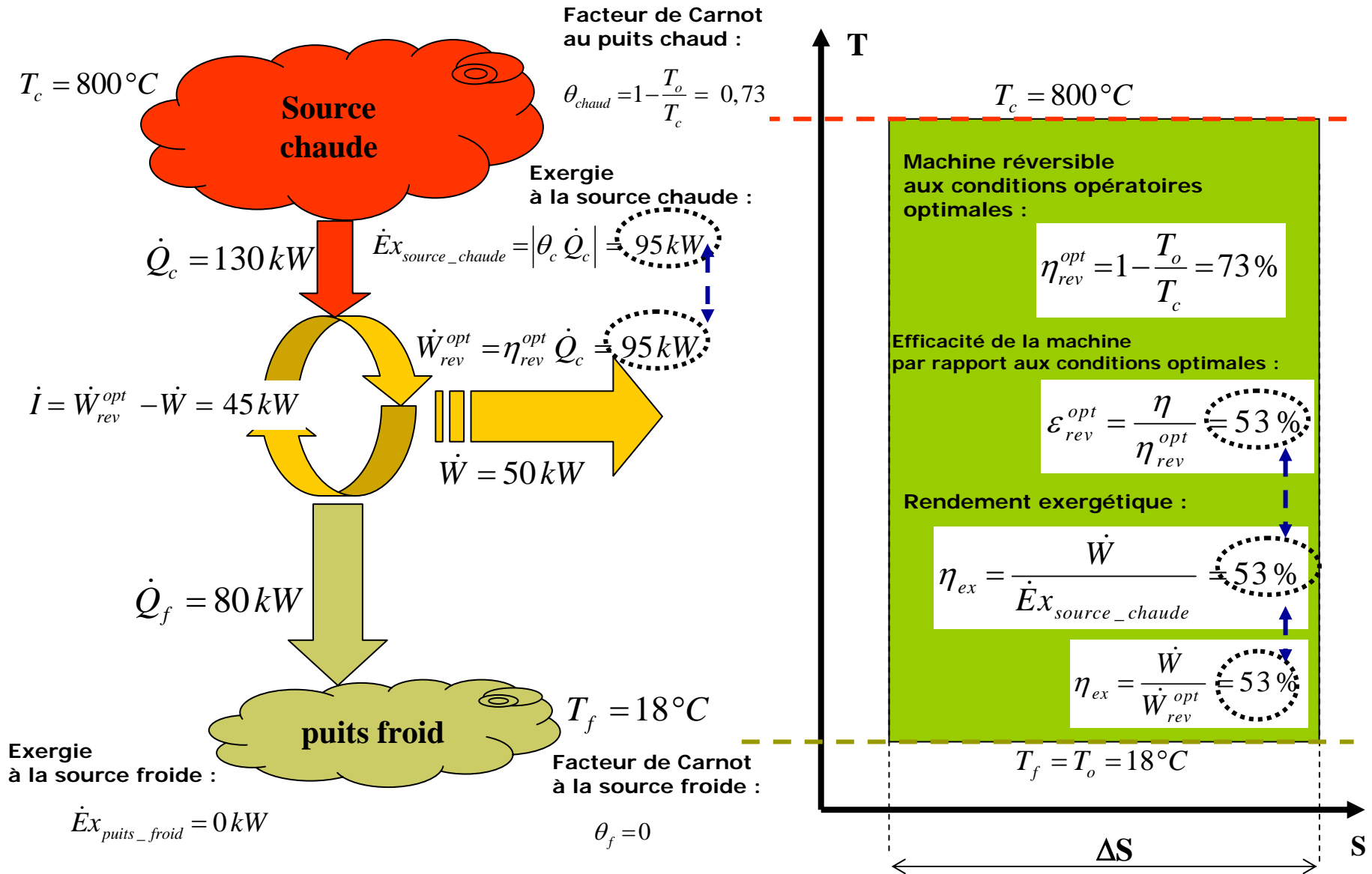
Machines dithermes à cycle inverse et à cycle directe



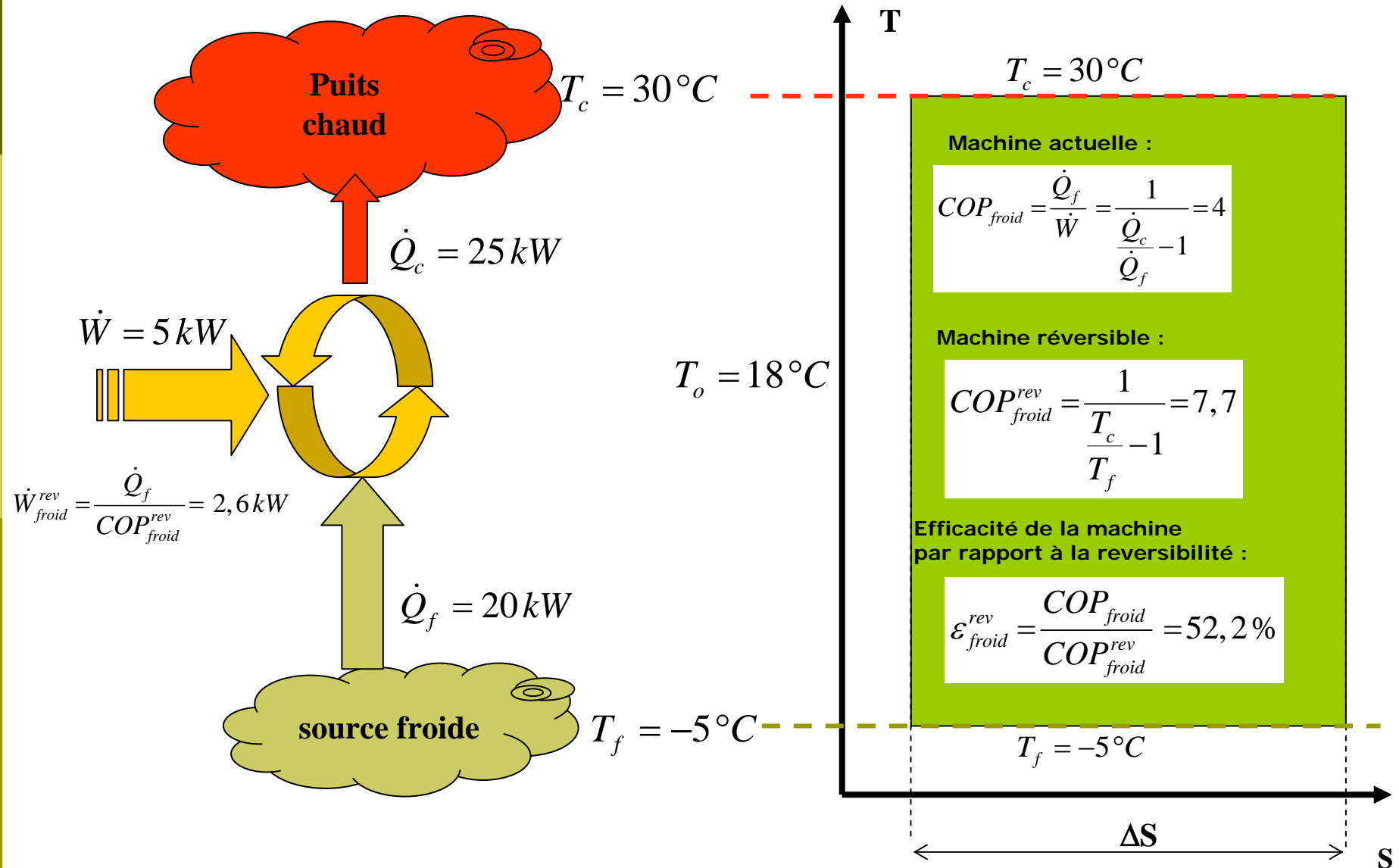
Machine Motrice : analyse énergétique



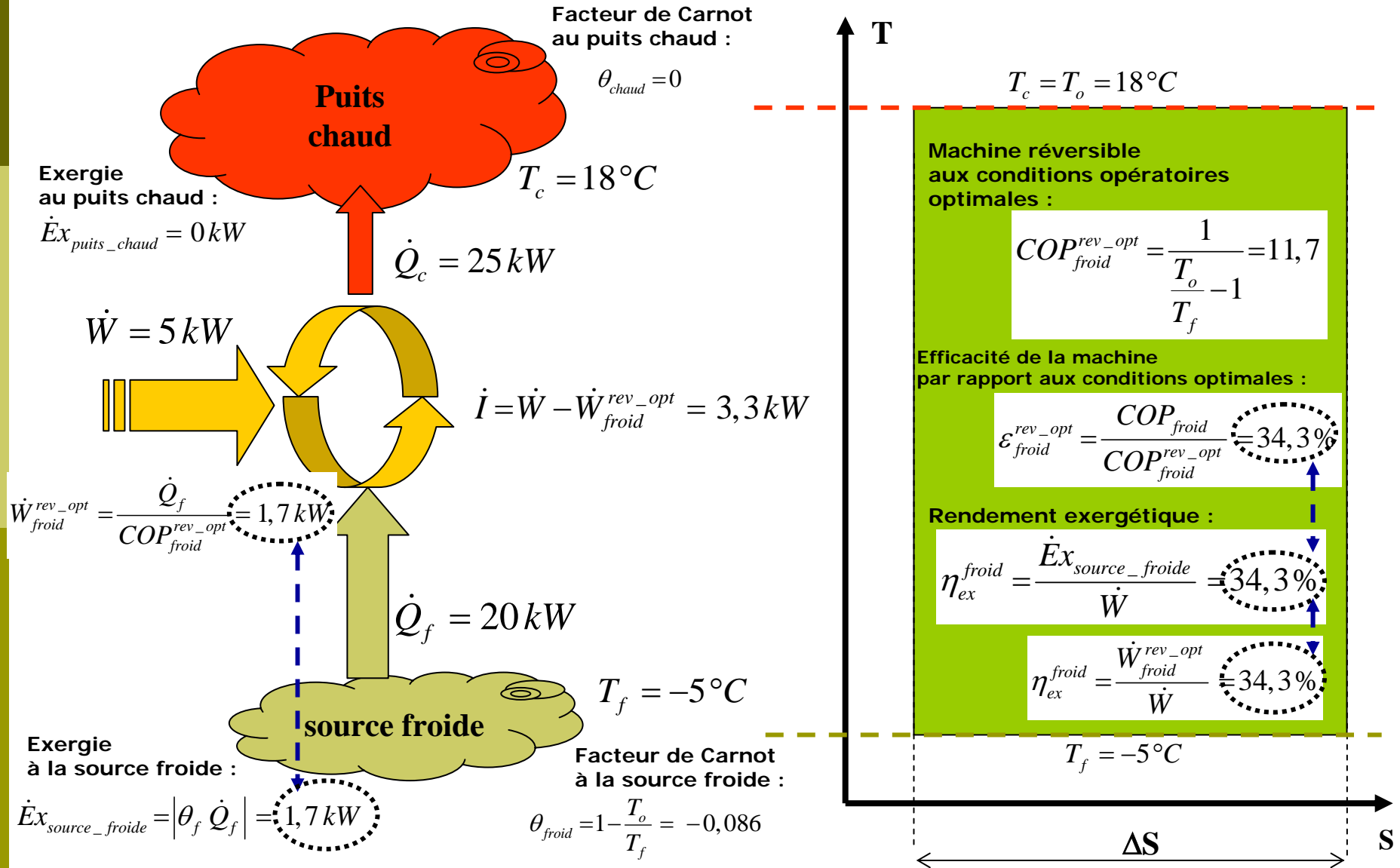
Machine Motrice : analyse exergétique



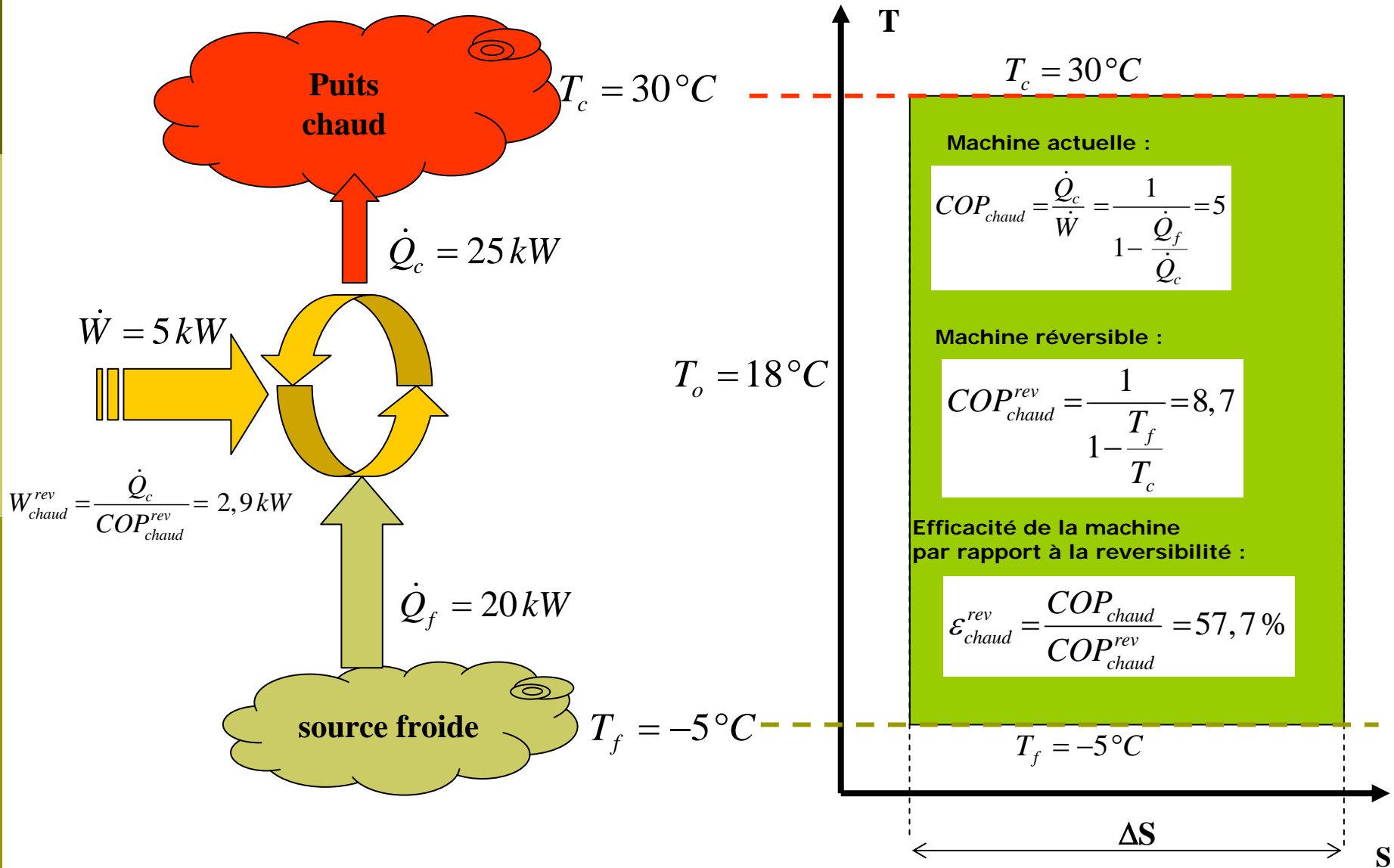
Machine Frigorifique : analyse énergétique



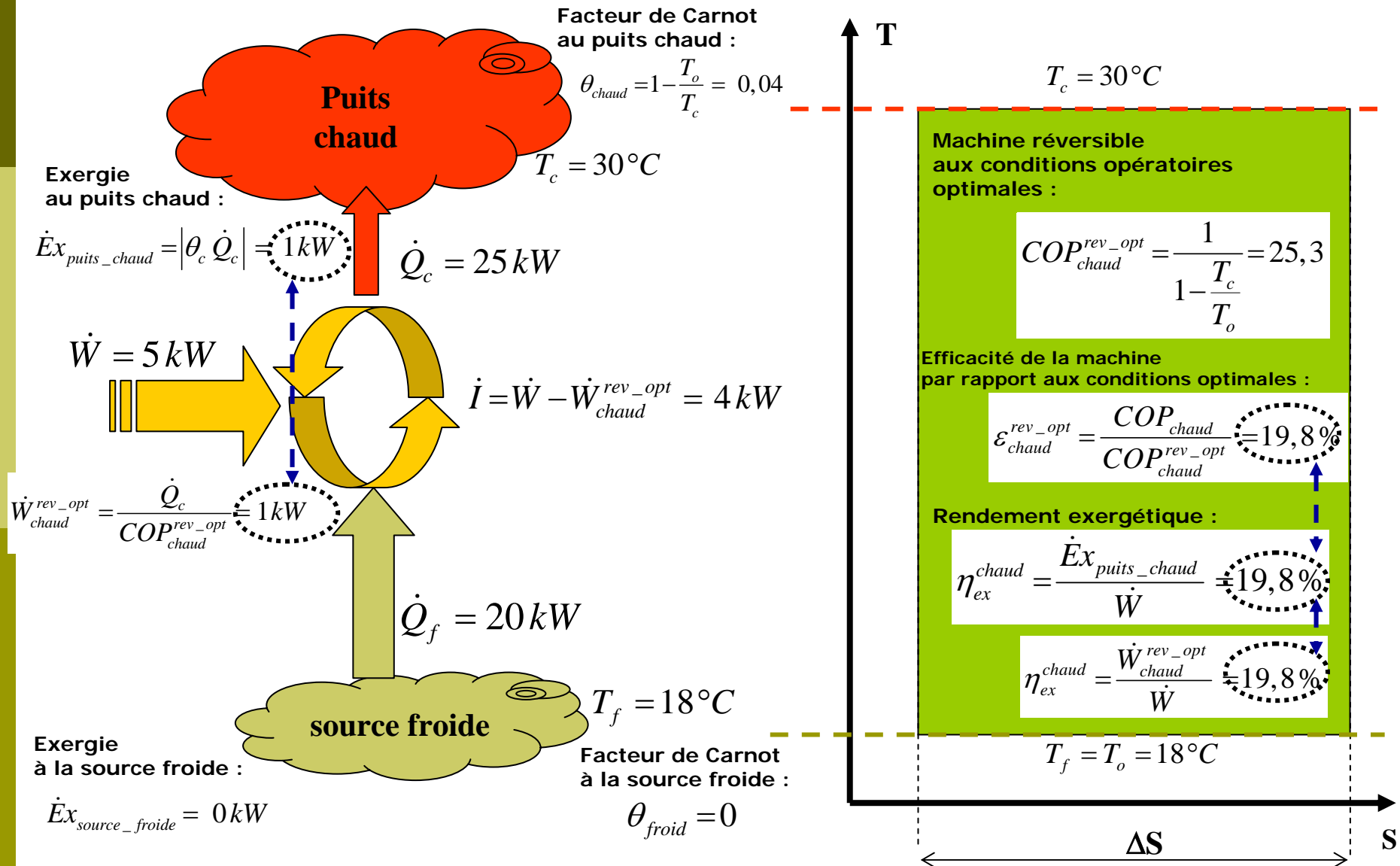
Machine Frigorifique : analyse exergetique



Pompe à chaleur : analyse énergétique



Pompe à chaleur : analyse exergetique



Analyse exergetique du transfert de chaleur



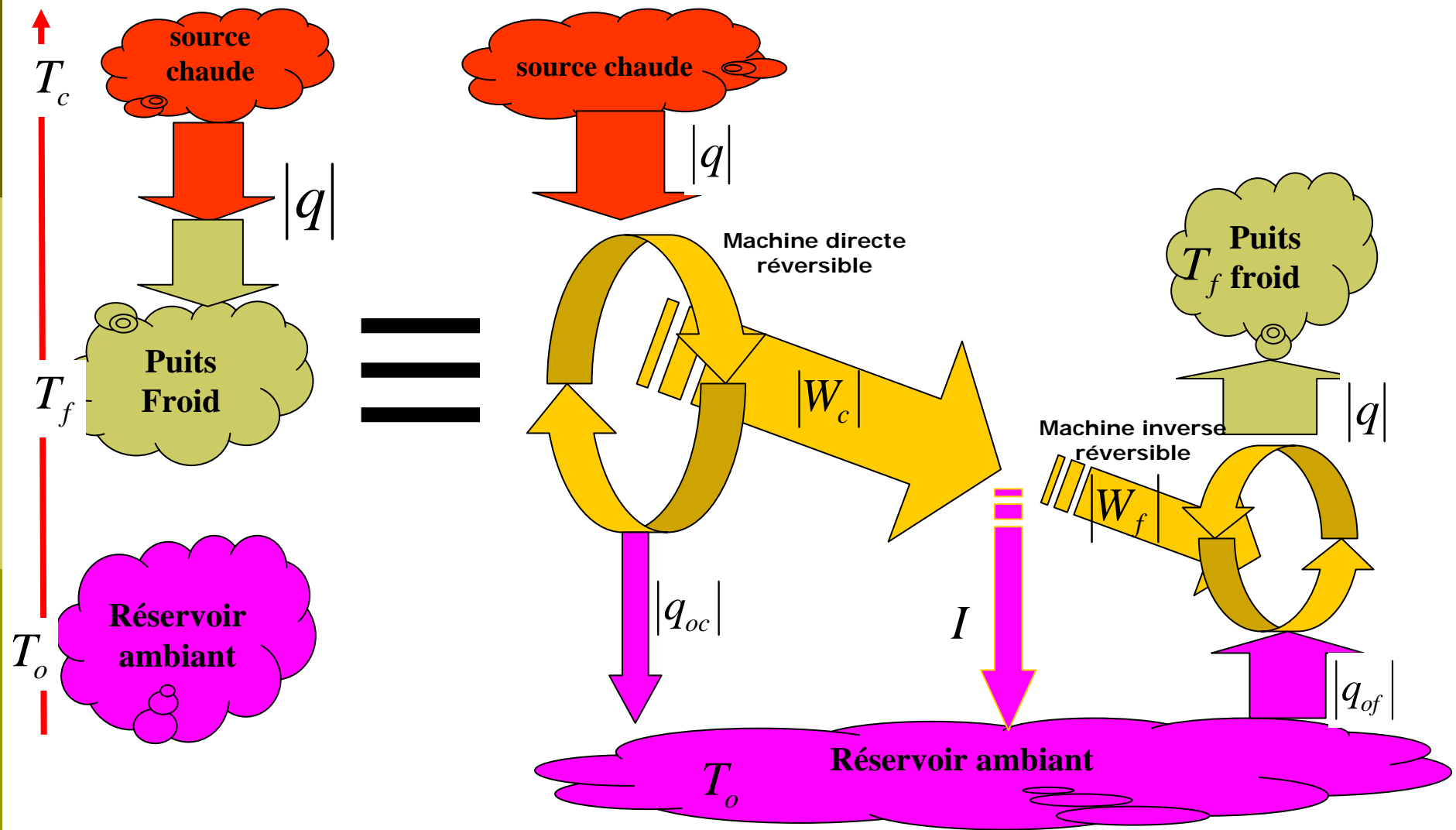
Irréversibilités Généralisées I_G

Facteur Dissipatif Généralisé ξ_G

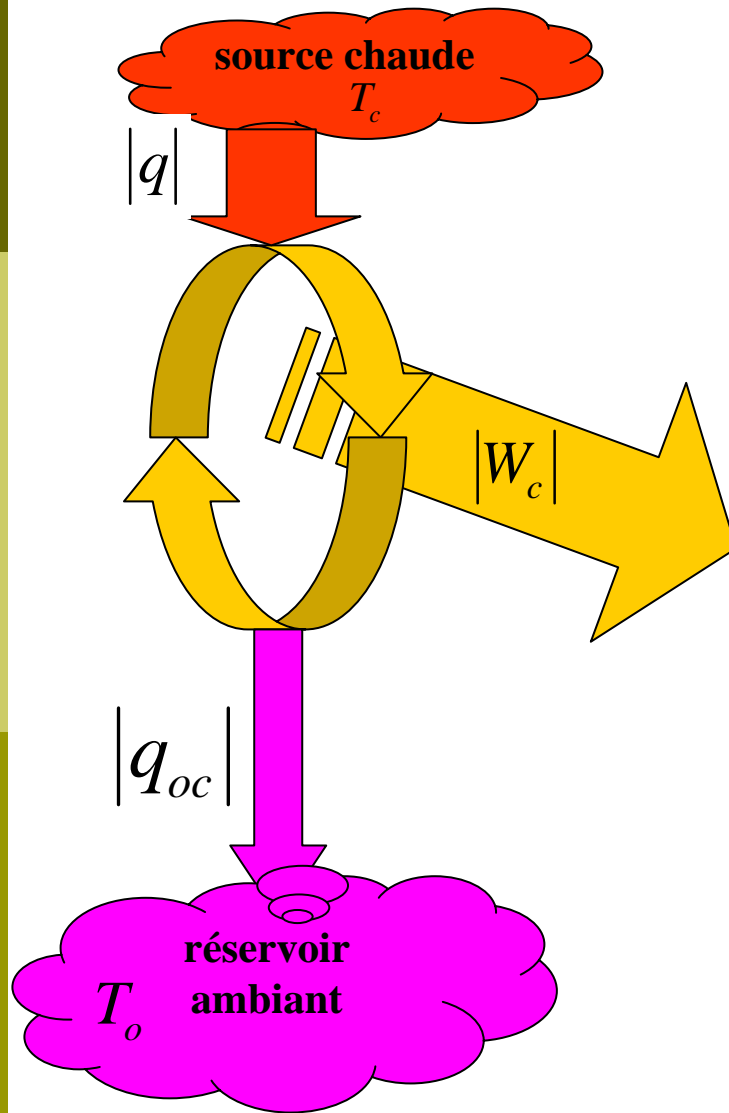
Rendement Exergetique Généralisé η_{ex_G}

(R. Benelmir - enveloppe Soleau oct. 2006 – IJEEE vol.11 n°.4)

$$T_c > T_f > T_o$$



Considération de la machine à cycle direct



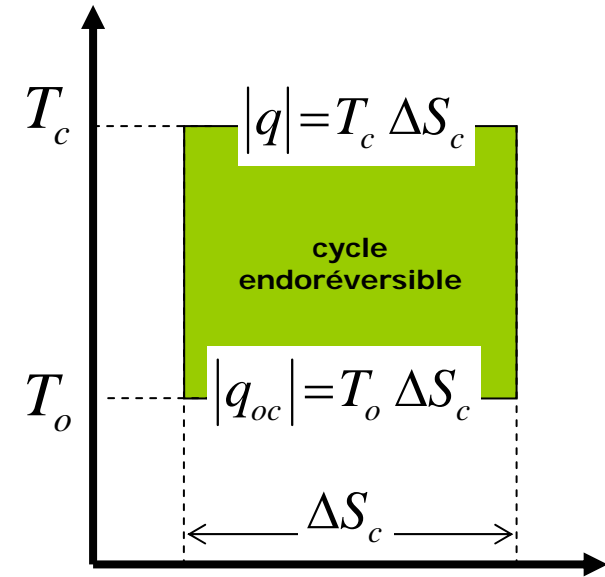
Rendement énergétique :

$$\eta_c = \frac{|W_c|}{|q|} = 1 - \frac{|q_{oc}|}{|q|}$$

Absence d'irrégularités :

↳ $\eta_c = 1 - \frac{T_o}{T_c} = \theta_c$ *Facteur de Carnot*

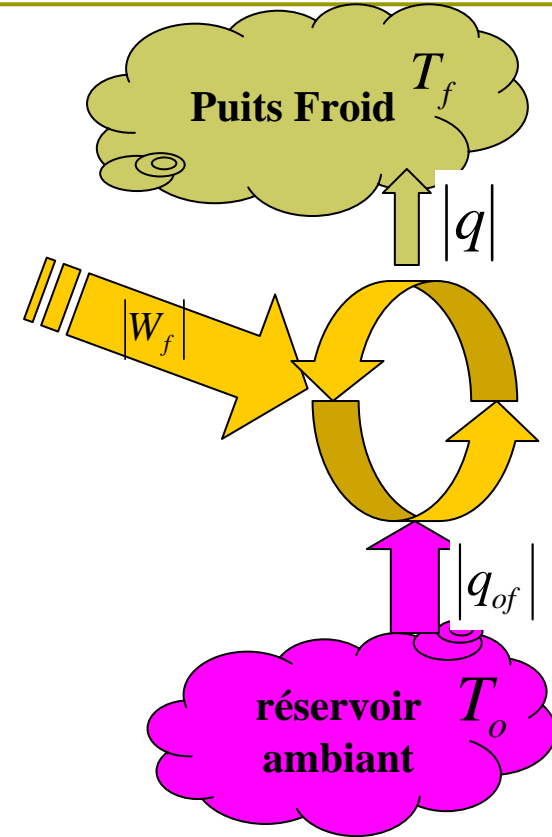
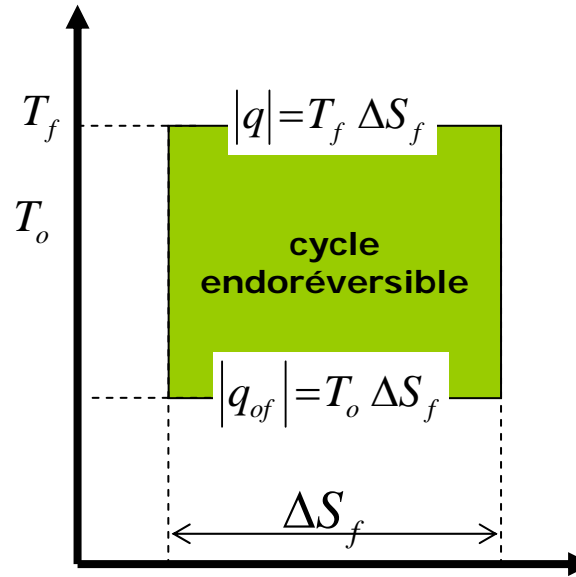
↳ $|W_c| = \theta_c |q| = Ex_c$ *Exergie Source Chaude*



Considération de la machine à cycle inverse

Coefficient de Performance:

$$COP_f = \frac{|q_{of}|}{|W_f|} = \frac{1}{1 - \frac{|q_{of}|}{|q|}}$$



Absence d'irréversibilités :

$$\frac{|W_f|}{|q|} = 1 - \frac{|q_{of}|}{|q|} = 1 - \frac{T_o}{T_f} = \theta_f \quad \text{Facteur de Carnot}$$

$$|W_f| = \theta_f |q| = Ex_f \quad \text{Exergie Puits Froid}$$

$$\theta_c > \theta_f > 0$$

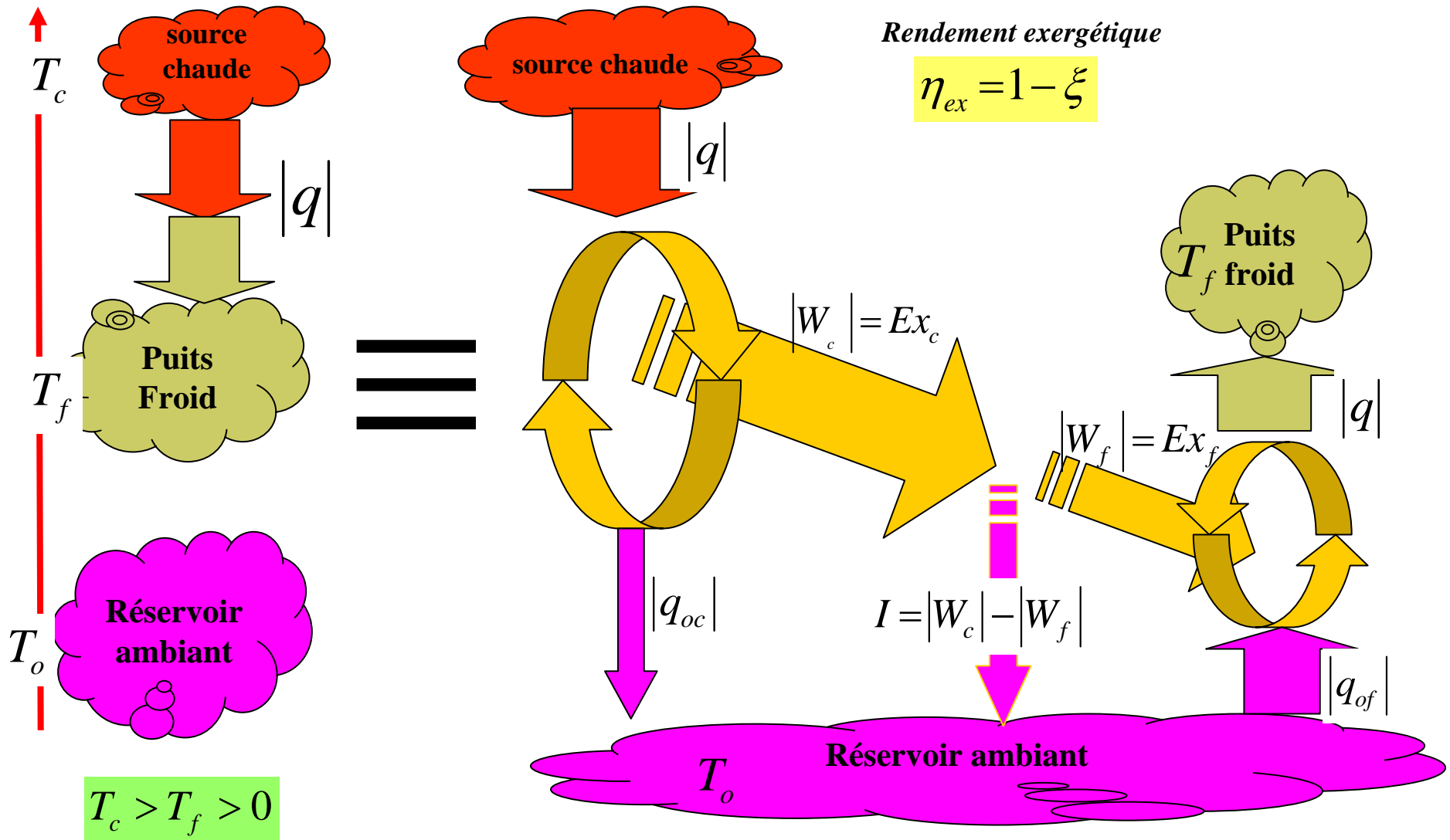
$$Ex_c > Ex_f$$

$$I = |W_c| - |W_f|$$

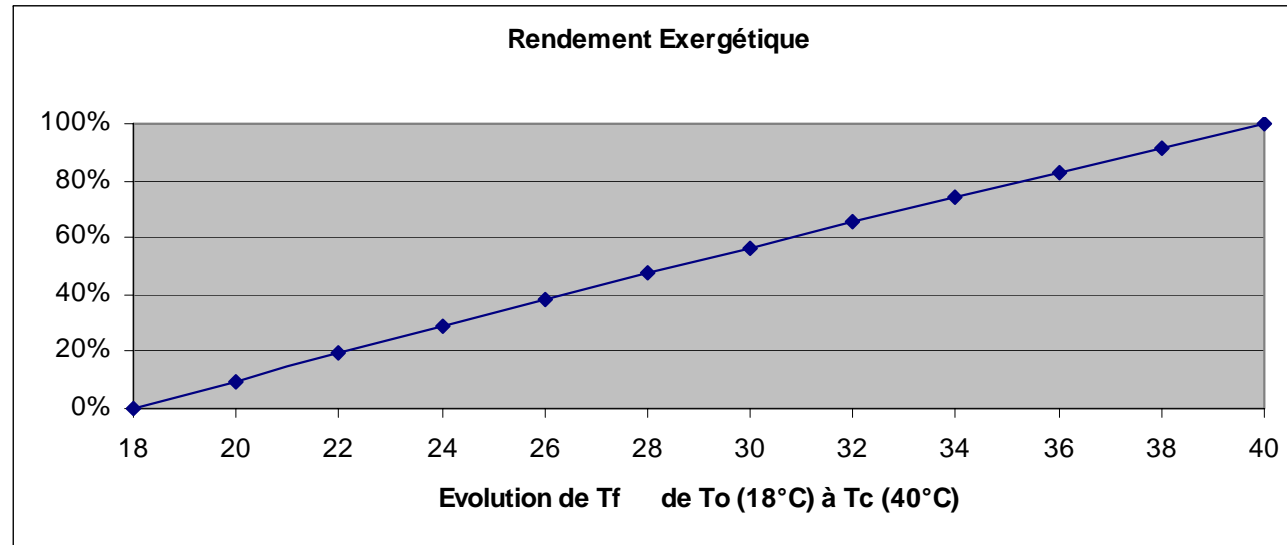
$$= Ex_c - Ex_f$$

$$= \max \{ Ex_c, Ex_f \} - \min \{ Ex_c, Ex_f \}$$

$$\xi = \frac{I}{Ex_c} = \frac{\max \{ Ex_c, Ex_f \} - \min \{ Ex_c, Ex_f \}}{\max \{ Ex_c, Ex_f \}}$$

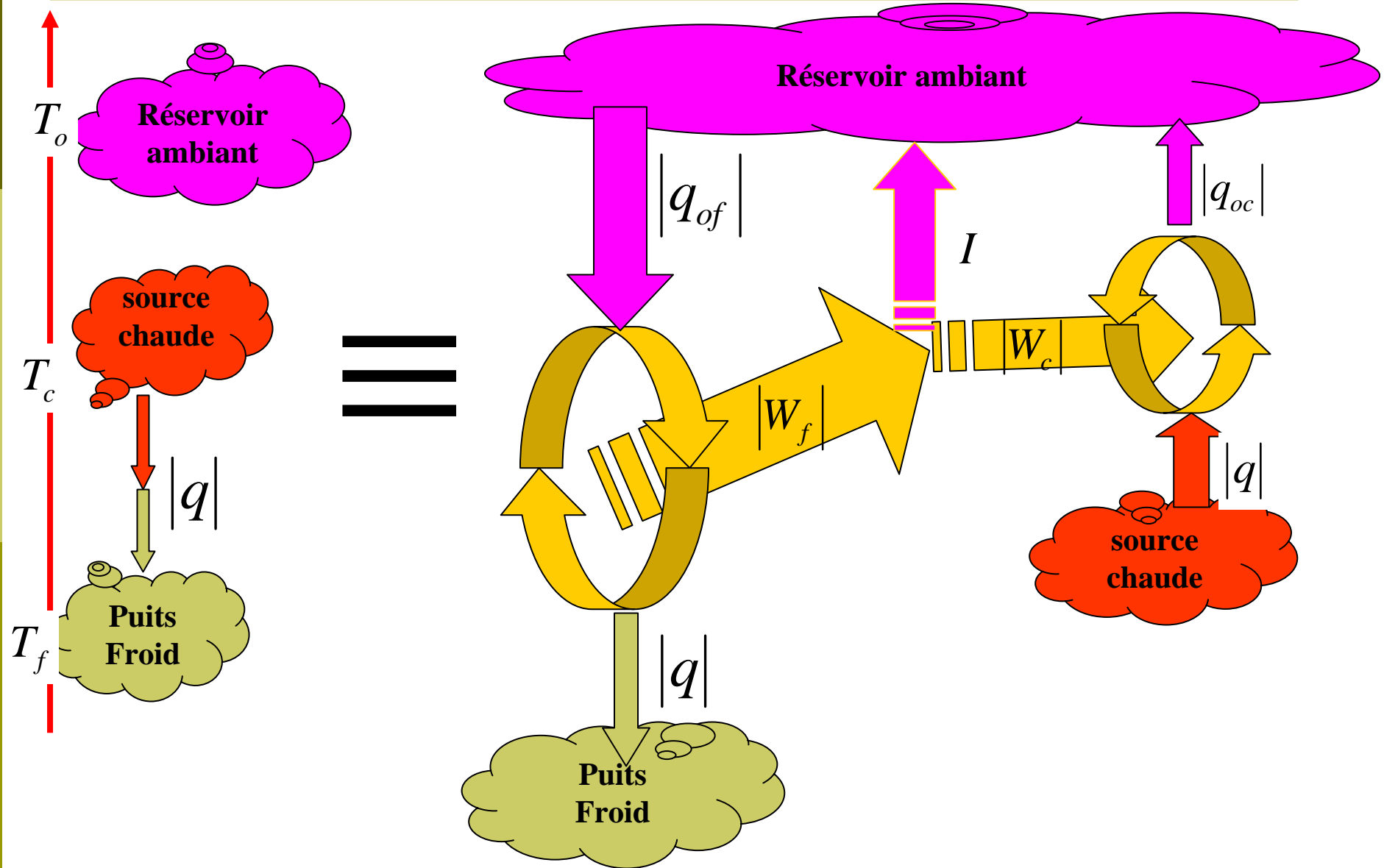


Vérification

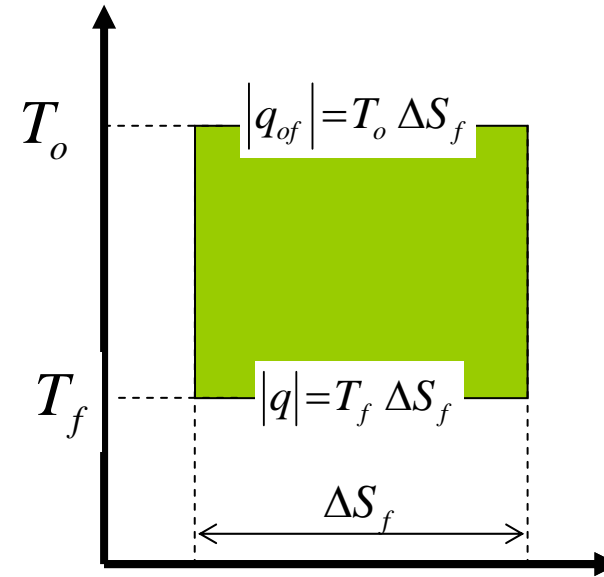
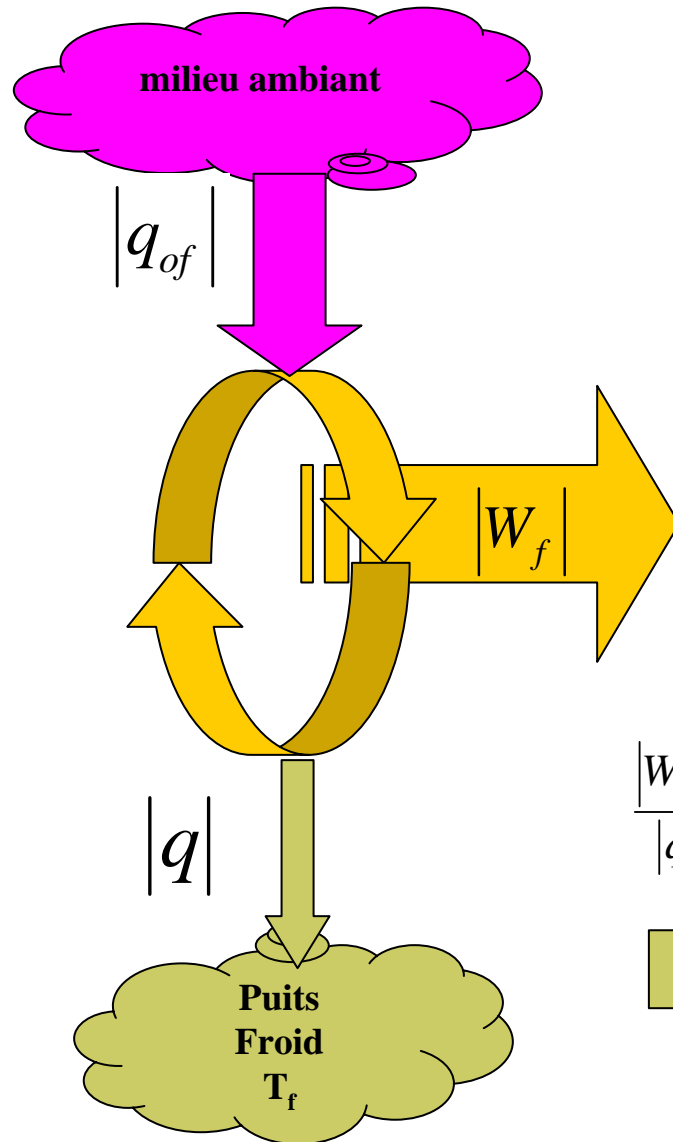


| | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| kJ | q | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| °C | T _o | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| °C | T _c | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| °C | T _f | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 |
| | θ _f | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| | θ _c | 0.000 | 0.007 | 0.014 | 0.020 | 0.027 | 0.033 | 0.040 | 0.046 | 0.052 | 0.058 | 0.064 | 0.070 |
| kJ | Ex _f | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 | 35.1 |
| kJ | Ex _c | 0.0 | 3.4 | 6.8 | 10.1 | 13.4 | 16.6 | 19.8 | 22.9 | 26.0 | 29.1 | 32.1 | 35.1 |
| kJ | I | 35.1 | 31.7 | 28.4 | 25.0 | 21.8 | 18.5 | 15.3 | 12.2 | 9.1 | 6.0 | 3.0 | 0.0 |
| | ξ | 100.0% | 90.3% | 80.7% | 71.3% | 61.9% | 52.7% | 43.7% | 34.7% | 25.9% | 17.1% | 8.5% | 0.0% |
| | η _{ex_G} | 0% | 10% | 19% | 29% | 38% | 47% | 56% | 65% | 74% | 83% | 91% | 100% |

$$T_o > T_c > T_f$$



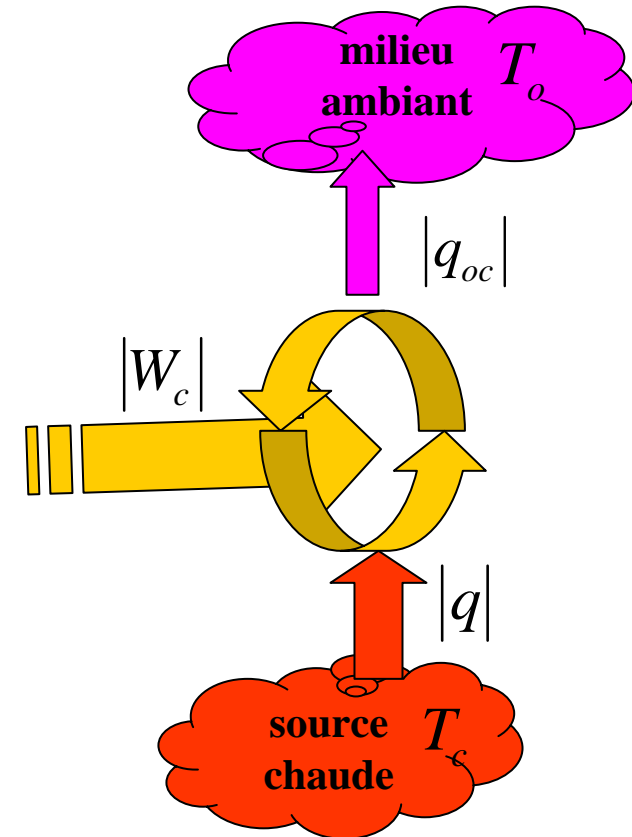
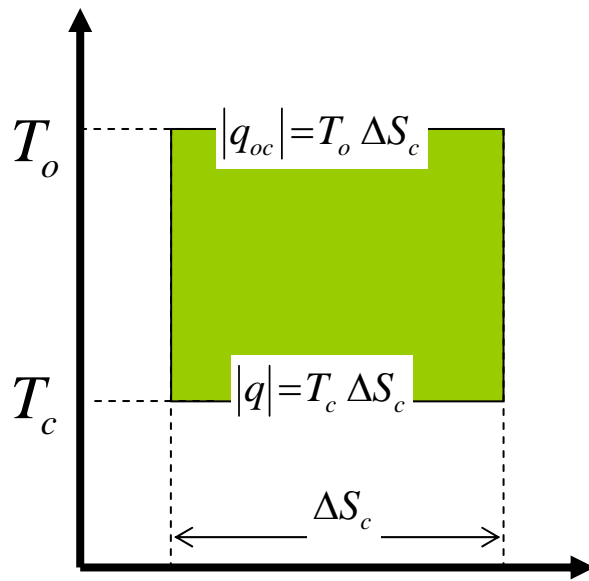
Considération de la machine à cycle direct



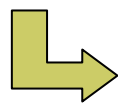
$$\frac{|W_f|}{|q|} = \frac{|q_{of}|}{|q|} - 1 = \frac{T_o}{T_f} - 1 = -\theta_f$$

$$\hookrightarrow |W_f| = -\theta_f |q| = Ex_f \quad \text{Exergie Puits Froid}$$

Considération de la machine à cycle inverse



$$\frac{|W_c|}{|q|} = \frac{|q_{oc}|}{|q|} - 1 = \frac{T_o}{T_c} - 1 = -\theta_c$$



$$|W_c| = -\theta_c |q| = Ex_c \quad \text{Exergie Source Chaude}$$

$$0 > \theta_c > \theta_f$$

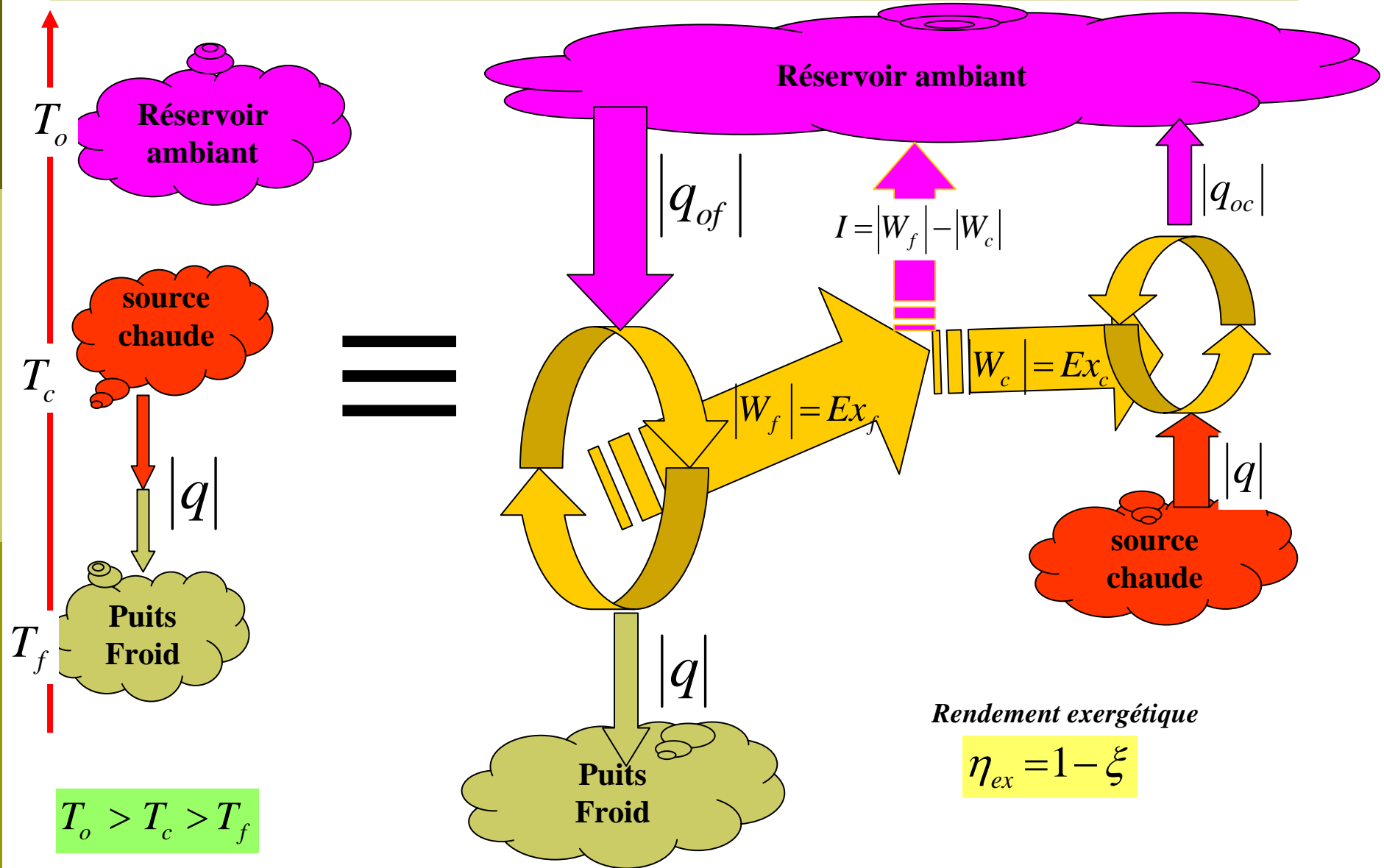
$$Ex_f > Ex_c$$

$$I = |W_f| - |W_c|$$

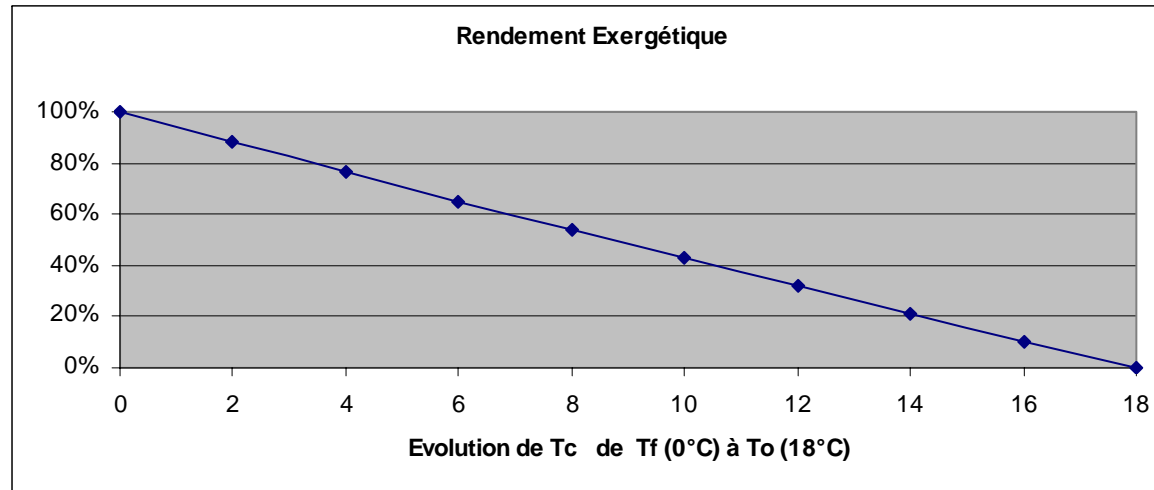
$$= Ex_f - Ex_c$$

$$= \max \{ Ex_c, Ex_f \} - \min \{ Ex_c, Ex_f \}$$

$$\xi = \frac{I}{Ex_c} = \frac{\max \{ Ex_c, Ex_f \} - \min \{ Ex_c, Ex_f \}}{\max \{ Ex_c, Ex_f \}}$$

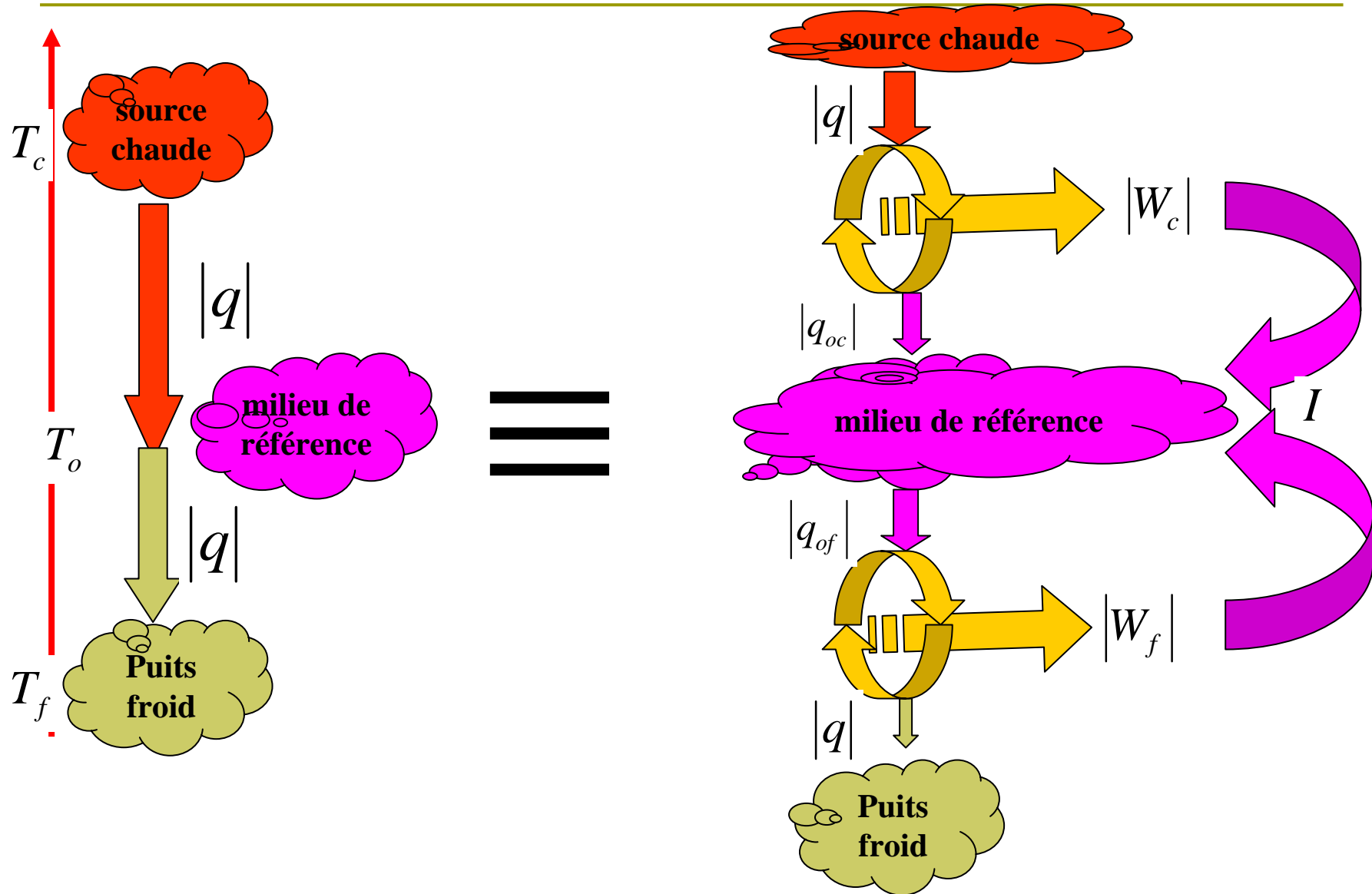


Vérification

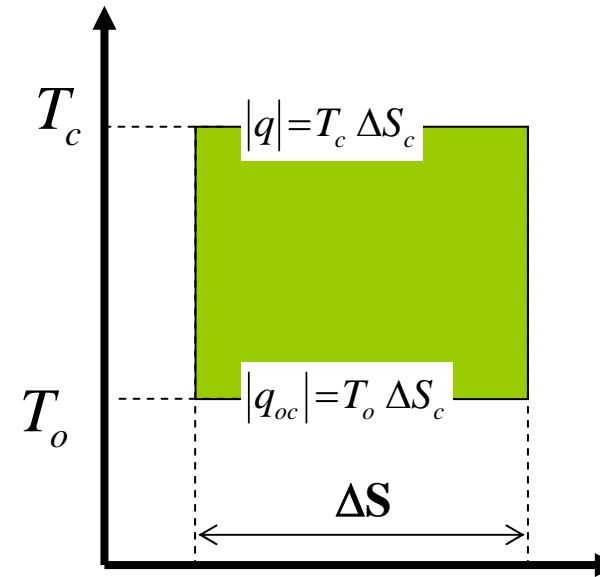
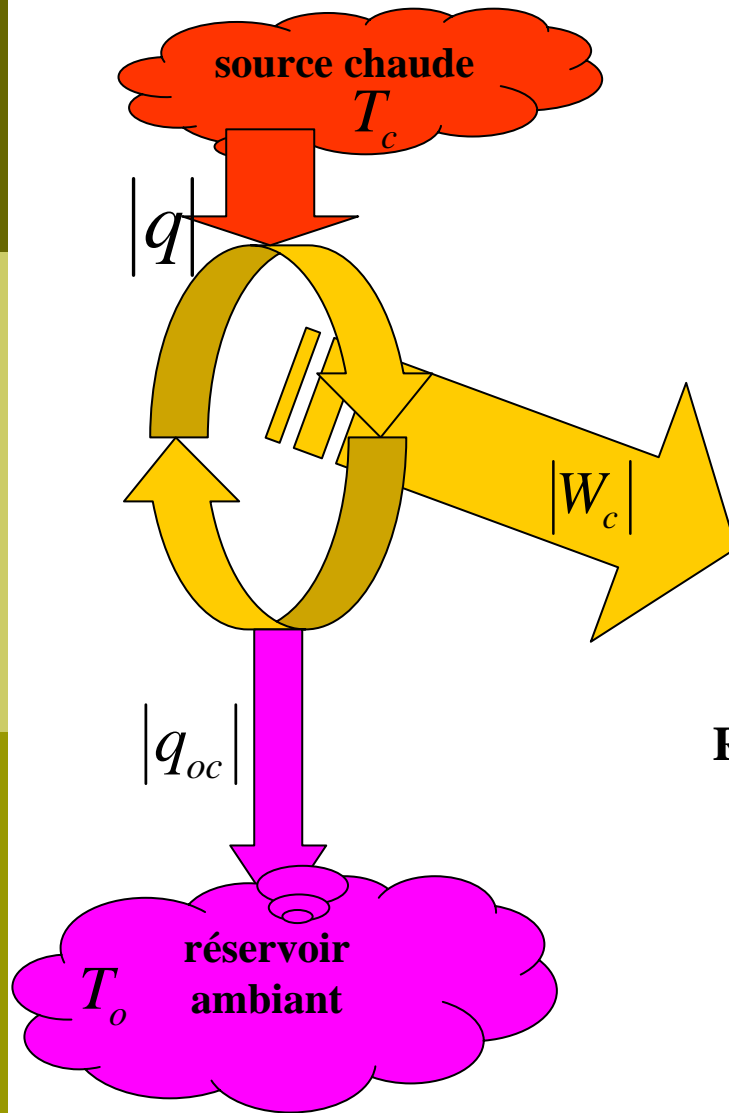


| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| kJ | q | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| °C | T _o | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| °C | T _c | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| °C | T _f | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | θ _f | -0.066 | -0.058 | -0.051 | -0.043 | -0.036 | -0.028 | -0.021 | -0.014 | -0.007 | 0.000 |
| | θ _c | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 | -0.066 |
| kJ | Ex _f | 32.9 | 29.1 | 25.3 | 21.5 | 17.8 | 14.1 | 10.5 | 7.0 | 3.5 | 0.0 |
| kJ | Ex _c | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 | 32.9 |
| kJ | I | 0.0 | 3.9 | 7.7 | 11.5 | 15.2 | 18.8 | 22.4 | 26.0 | 29.5 | 32.9 |
| | ξ | 0.0% | 11.8% | 23.3% | 34.8% | 46.0% | 57.1% | 68.1% | 78.9% | 89.5% | 100.0% |
| | η _{ex_G} | 100% | 88% | 77% | 65% | 54% | 43% | 32% | 21% | 10% | 0% |

$$T_c > T_o > T_f$$



Considération de la 1^{ère} machine à cycle direct

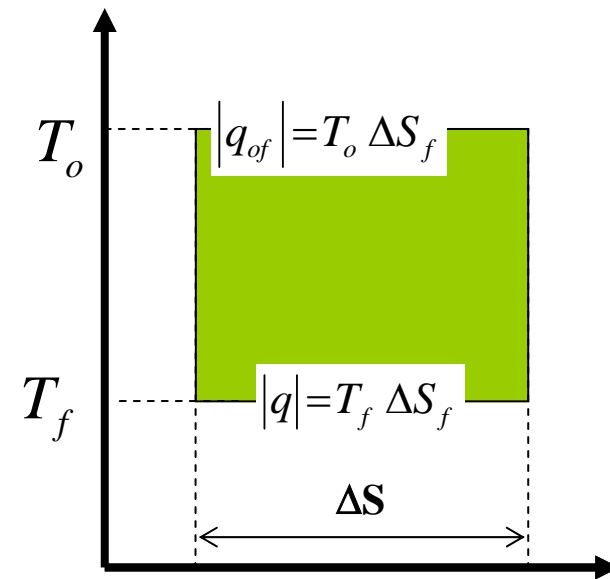
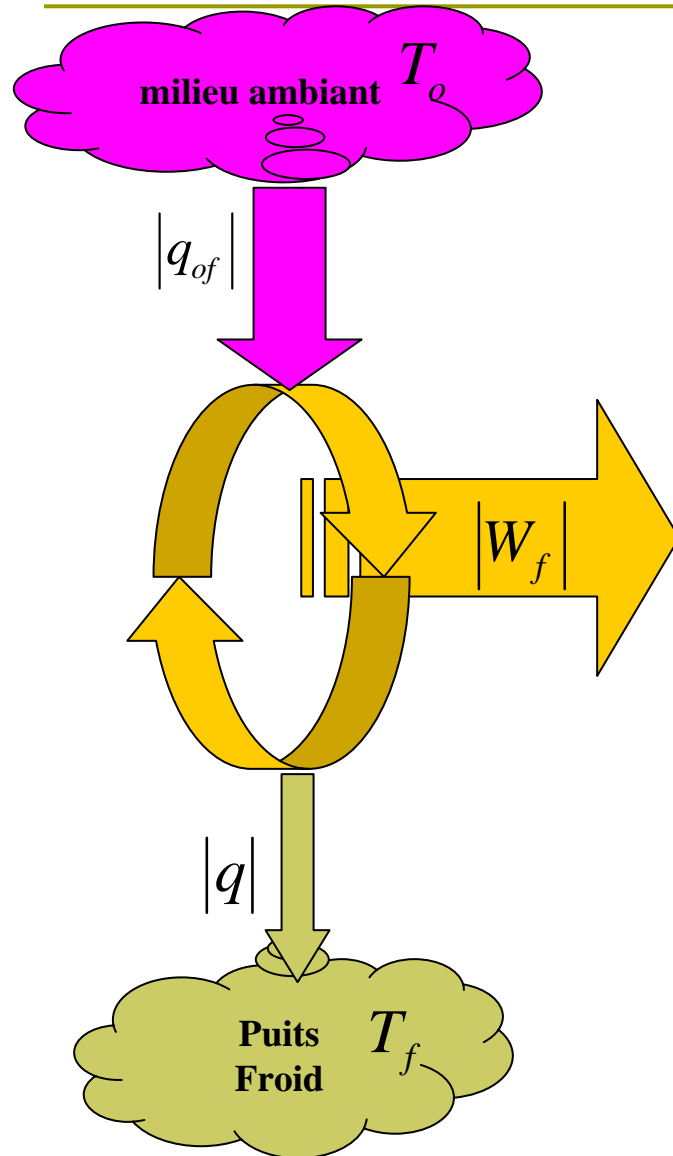


Rendement :

$$\eta_c = \frac{|W_c|}{|q|} = 1 - \frac{|q_{oc}|}{|q|} = 1 - \frac{T_o}{T_c} = \theta_c \quad \text{Facteur de Carnot}$$

$$\hookrightarrow |W_c| = \theta_c |q| = Ex_c \quad \text{Exergie Source Chaude}$$

Considération de la 2^{ème} machine à cycle direct



$$\frac{|W_f|}{|q|} = \frac{|q_{of}|}{|q|} - 1 = \frac{T_o}{T_f} - 1 = -\theta_f$$

$$\hookrightarrow |W_f| = -\theta_f |q| = Ex_f \quad \text{Exergie Puits Froid}$$

$$\theta_c > 0 > \theta_f$$

$$Ex_c > Ex_f$$

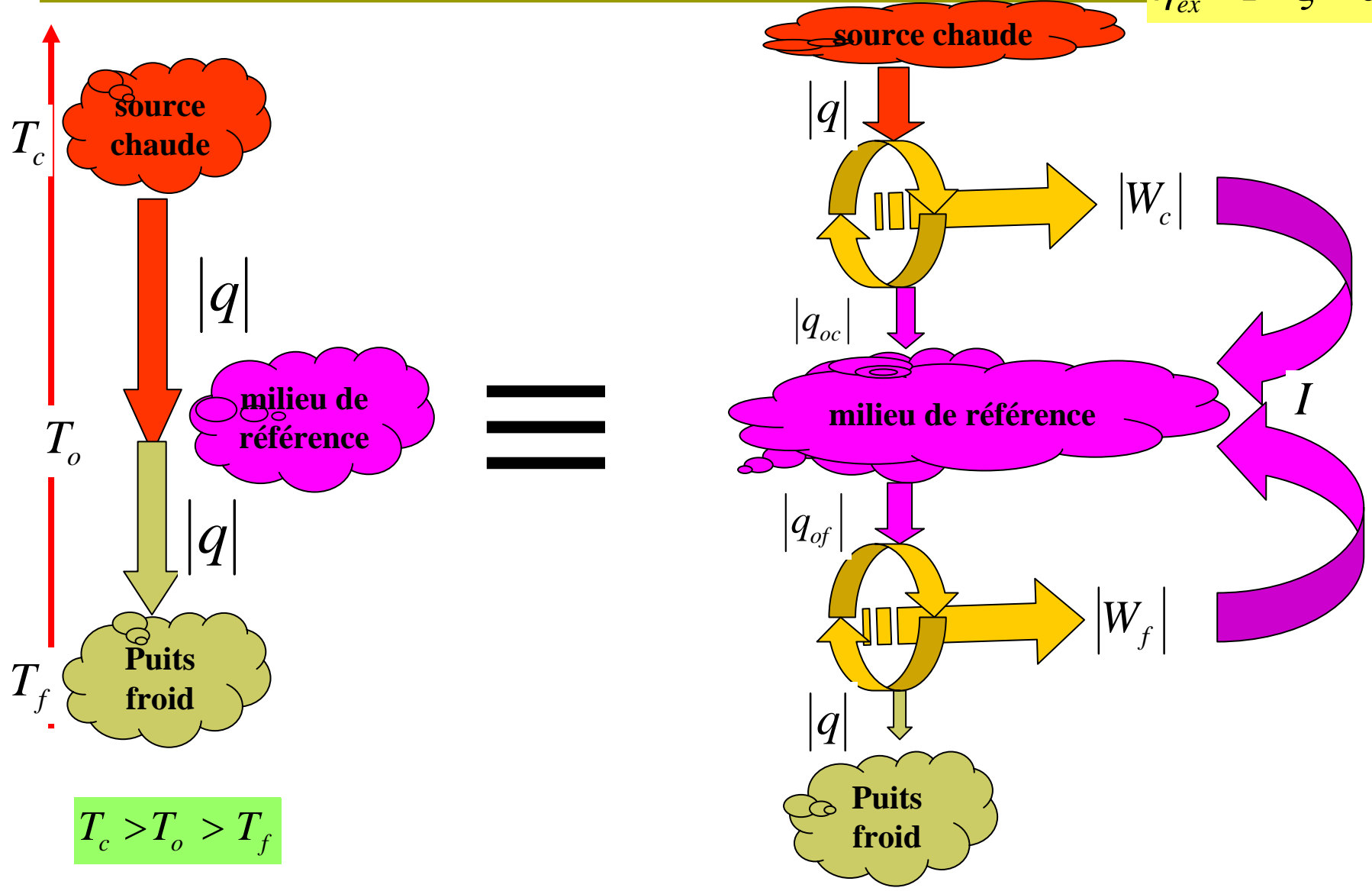
$$I = |W_c| + |W_f|$$

$$= Ex_f + Ex_c$$

$$= \max\{Ex_c, Ex_f\} + \min\{Ex_c, Ex_f\}$$

$$\xi = \frac{I}{Ex_c + Ex_f} = \frac{\max\{Ex_c, Ex_f\} + \min\{Ex_c, Ex_f\}}{\max\{Ex_c, Ex_f\} + \min\{Ex_c, Ex_f\}} = 1$$

$$\eta_{ex} = 1 - \xi = 0$$



Généralisation

$$T_c > T_f > 0 \quad \theta_c > \theta_f > 0$$

$$\xi = \frac{I}{Ex_c} = \frac{\max\{Ex_c, Ex_f\} - \min\{Ex_c, Ex_f\}}{\max\{Ex_c, Ex_f\}}$$

$$\eta_{ex} = 1 - \xi$$

$$T_o > T_c > T_f \quad 0 > \theta_c > \theta_f$$

$$\xi = \frac{I}{Ex_c} = \frac{\max\{Ex_c, Ex_f\} - \min\{Ex_c, Ex_f\}}{\max\{Ex_c, Ex_f\}}$$

$$\eta_{ex} = 1 - \xi$$

$$T_c > T_o > T_f \quad \theta_c > 0 > \theta_f$$

$$\xi = \frac{I}{Ex_c + Ex_f} = \frac{\max\{Ex_c, Ex_f\} + \min\{Ex_c, Ex_f\}}{\max\{Ex_c, Ex_f\} + \min\{Ex_c, Ex_f\}} = 1$$

$$\eta_{ex} = 1 - \xi = 0$$

$$T_c > T_f > 0$$

$$T_o > T_c > T_f$$

$$T_c > T_o > \theta_f$$

$$I_G = \max\{Ex_c, Ex_f\} - \left[\text{signe}\{\theta_c, \theta_f\} \min\{Ex_c, Ex_f\} \right]$$

$$\xi_G = \frac{\max\{Ex_c, Ex_f\} - \left[\text{signe}\{\theta_c, \theta_f\} \min\{Ex_c, Ex_f\} \right]}{\max\{Ex_c, Ex_f\} + \frac{\left[(1 - \text{signe}\{\theta_c, \theta_f\}) \min\{Ex_c, Ex_f\} \right]}{2}}$$

$$\eta_{ex_G} = 1 - \xi_G$$

Corollaire

$$T_c > T_f > 0 \quad \longrightarrow \quad \eta_{ex_G} > 0$$

$$T_o > T_c > T_f \quad \longrightarrow \quad \eta_{ex_G} > 0$$

$$T_c > T_o > T_f \quad \longrightarrow \quad \eta_{ex_G} = 0 \quad \forall T_c, T_f, T_o$$

que faire dans ce cas ?

Si les niveaux de températures sont inchangeables :



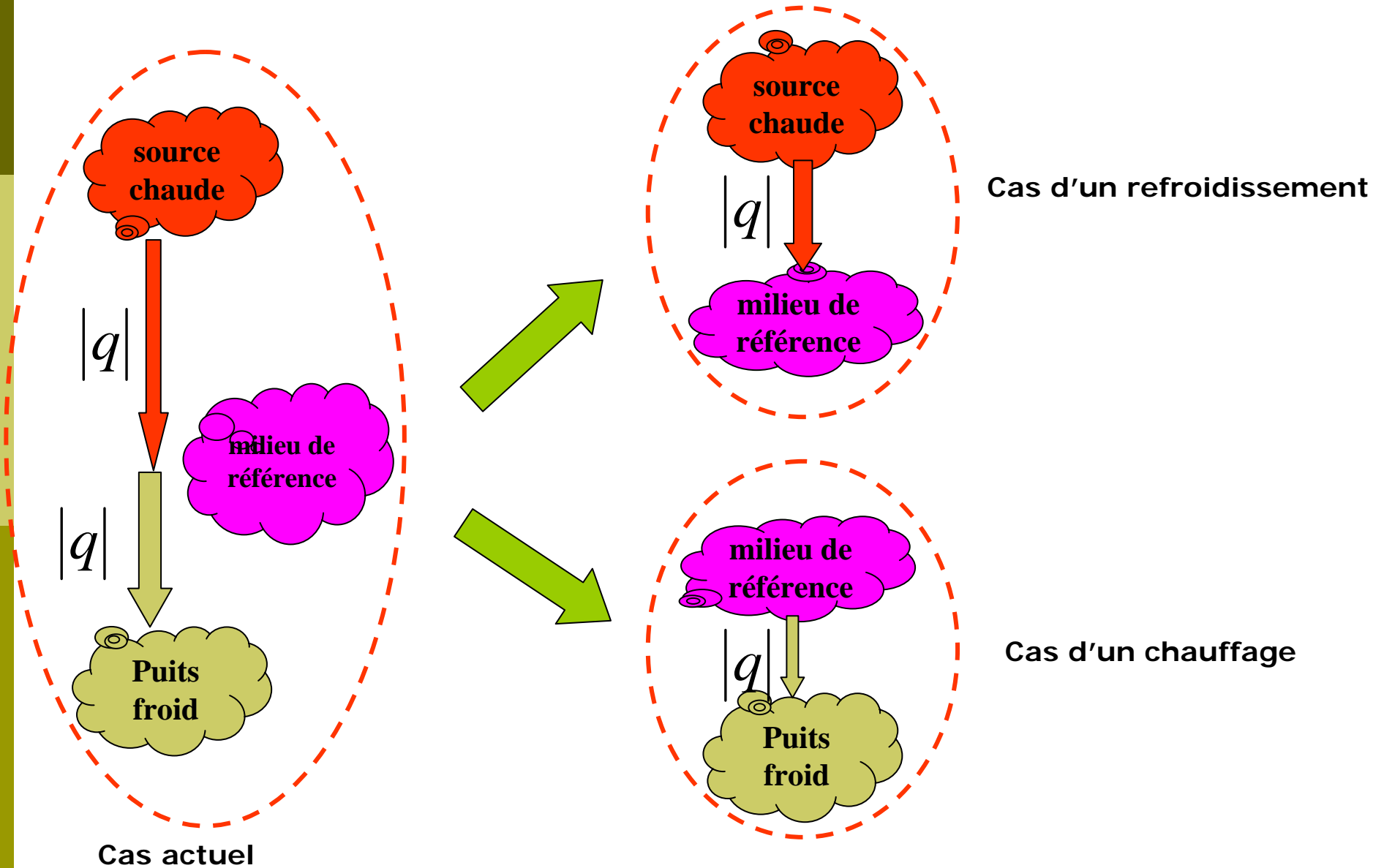
Calculer simplement les irréversibilités

S'il est possible d'optimiser le choix des niveaux de températures :



Utiliser le milieu de référence comme réservoir thermique

Substitution du milieu de référence à un des réservoirs thermiques



Application

| | | Cas I | Cas II | Cas III | Cas IV | Cas V |
|----------------|----|-------|--------|---------|--------|--------|
| q | kJ | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| T_o | °C | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| T_c | °C | 40 | 10 | 40 | 40 | 18 |
| T_f | °C | 20 | 0 | 0 | 18 | 0 |
| θ_f | | 0.070 | -0.028 | 0.070 | 0.070 | 0.000 |
| θ_c | | 0.007 | -0.066 | -0.066 | 0.000 | -0.066 |
| Ex_f | kJ | 35.1 | 14.1 | 35.1 | 35.1 | 0.0 |
| Ex_c | kJ | 3.4 | 32.9 | 32.9 | 0.0 | 32.9 |
| I | kJ | 31.7 | 18.8 | 68.1 | 35.1 | 32.9 |
| ξ | | 90.3% | 57.1% | 1 | 1 | 1 |
| η_{ex_G} | | 10% | 43% | 0% | 0% | 0% |

Merci pour votre attention



*Les outils de calcul (Excel) présentés ici
seront fournis sur simple demande.*

benelmir@lermab.uhp-nancy.fr