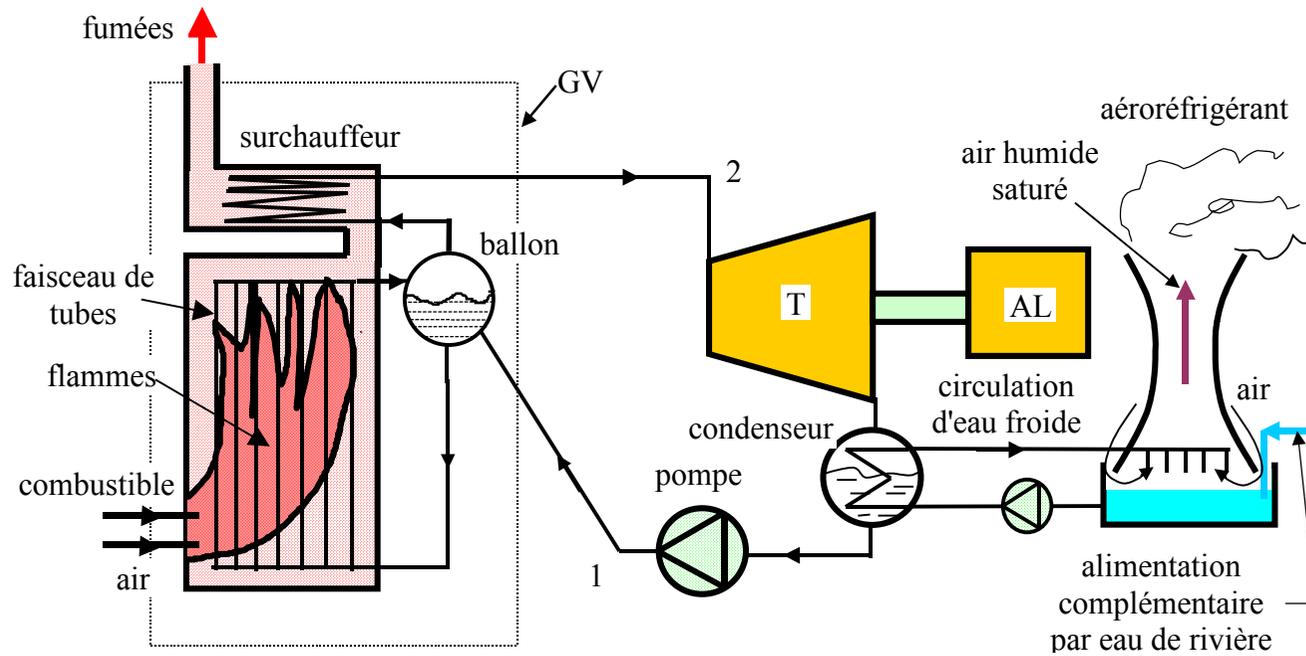


De la nécessité de **refroidir** avant de **réchauffer**
ou
du **deuxième principe** à la **thermo-économie**
en passant par
l'**exergie**

André LALLEMAND
cethyl
INSA de Lyon

Installation motrice à vapeur



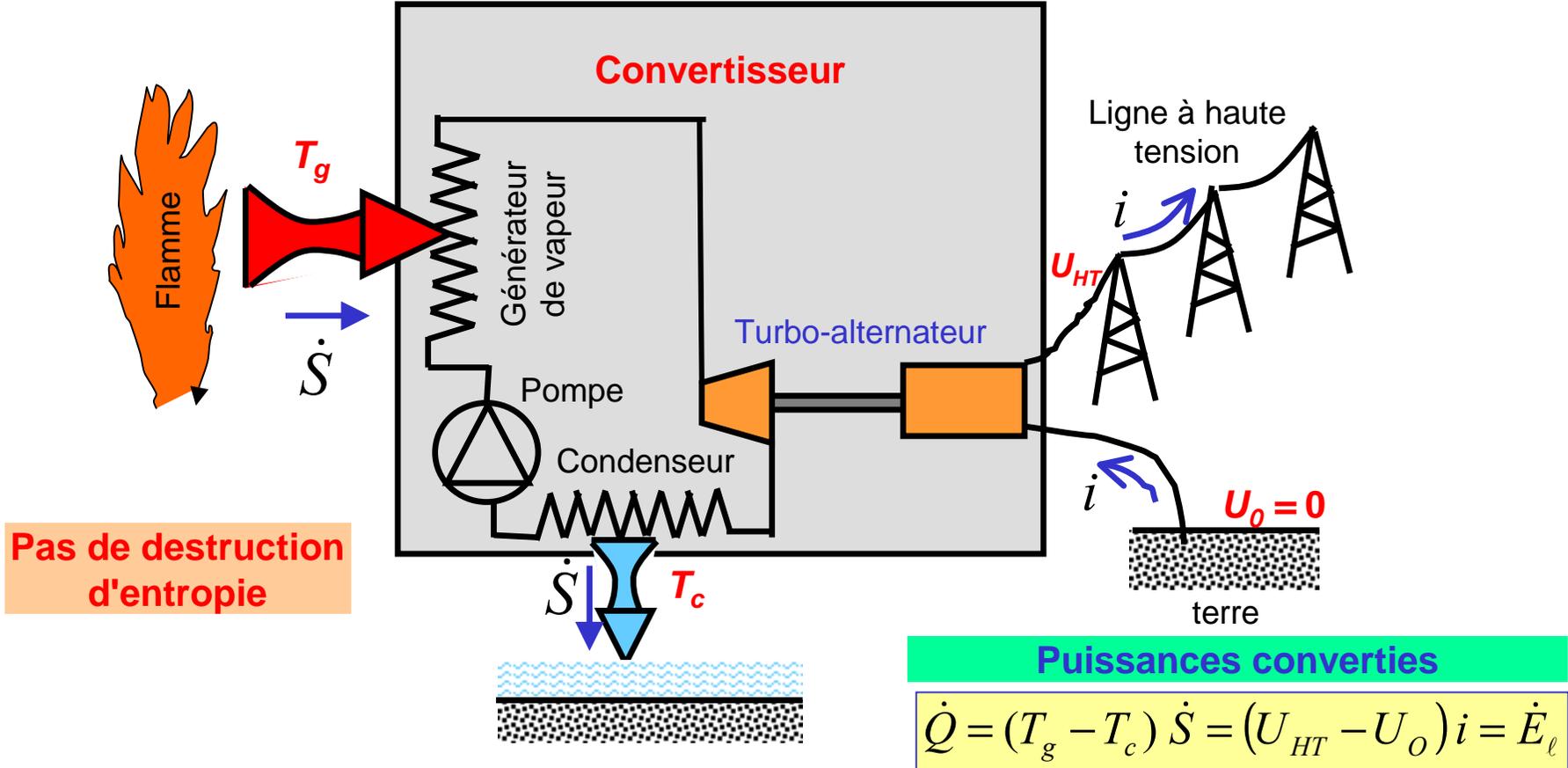
Il faut refroidir avant de réchauffer !!!!!

Fonctionnement cyclique mécanique et thermodynamique

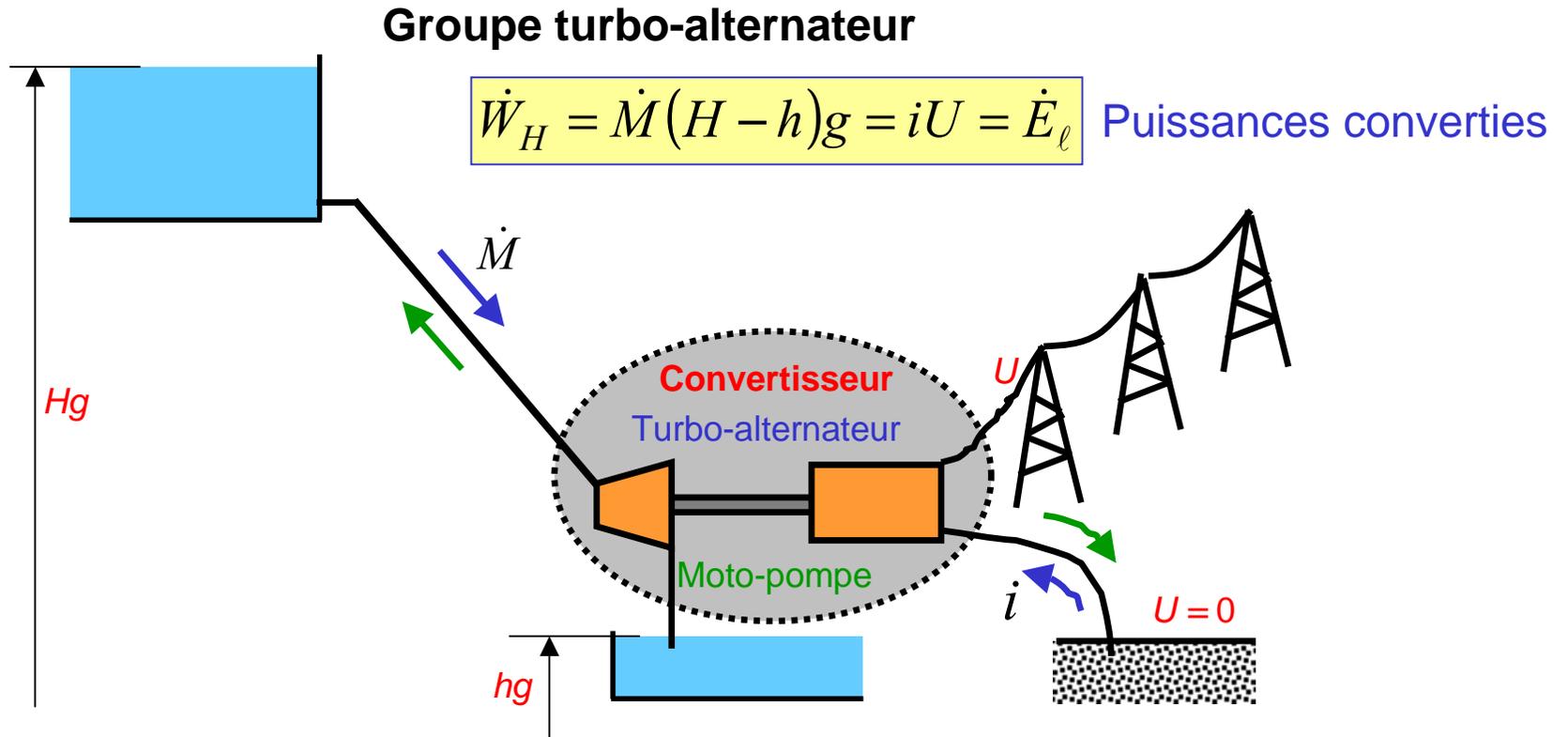
Convertisseur thermo-électrique

Groupe turbo-alternateur - Moteur thermique **ditherme** (chaude et froide)

Entropie = extensité liée à la chaleur - indestructible



Convertisseur hydro- électrique



Il faut rejeter de l'énergie hydraulique avant d'en admettre = conservation de la masse d'eau

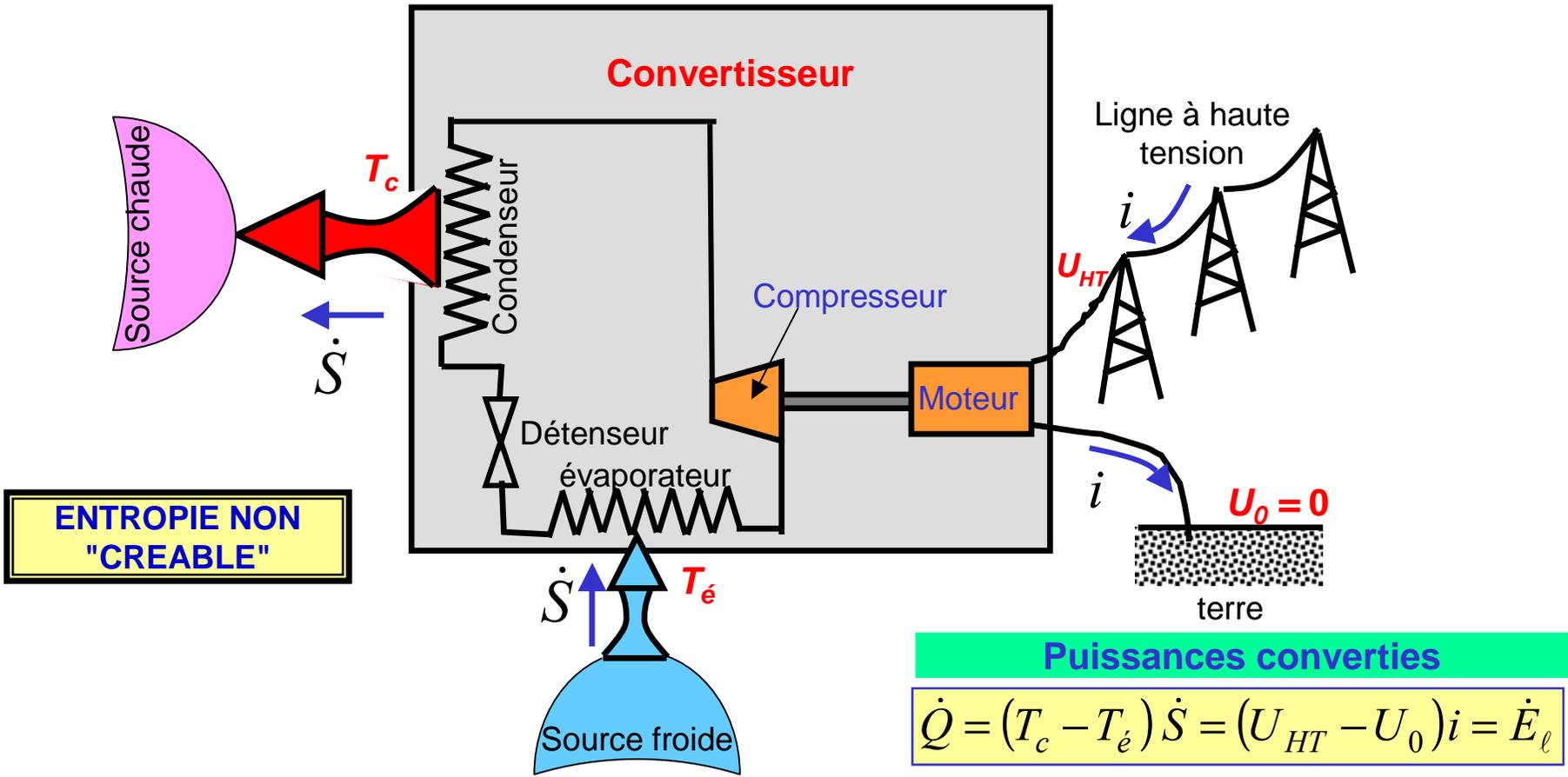
Convertisseur renversible ou réciproque (réversible ?) - Groupe moto-pompe

Il faut rejeter de l'énergie électrique avant d'en reprendre = conservation des charges électriques



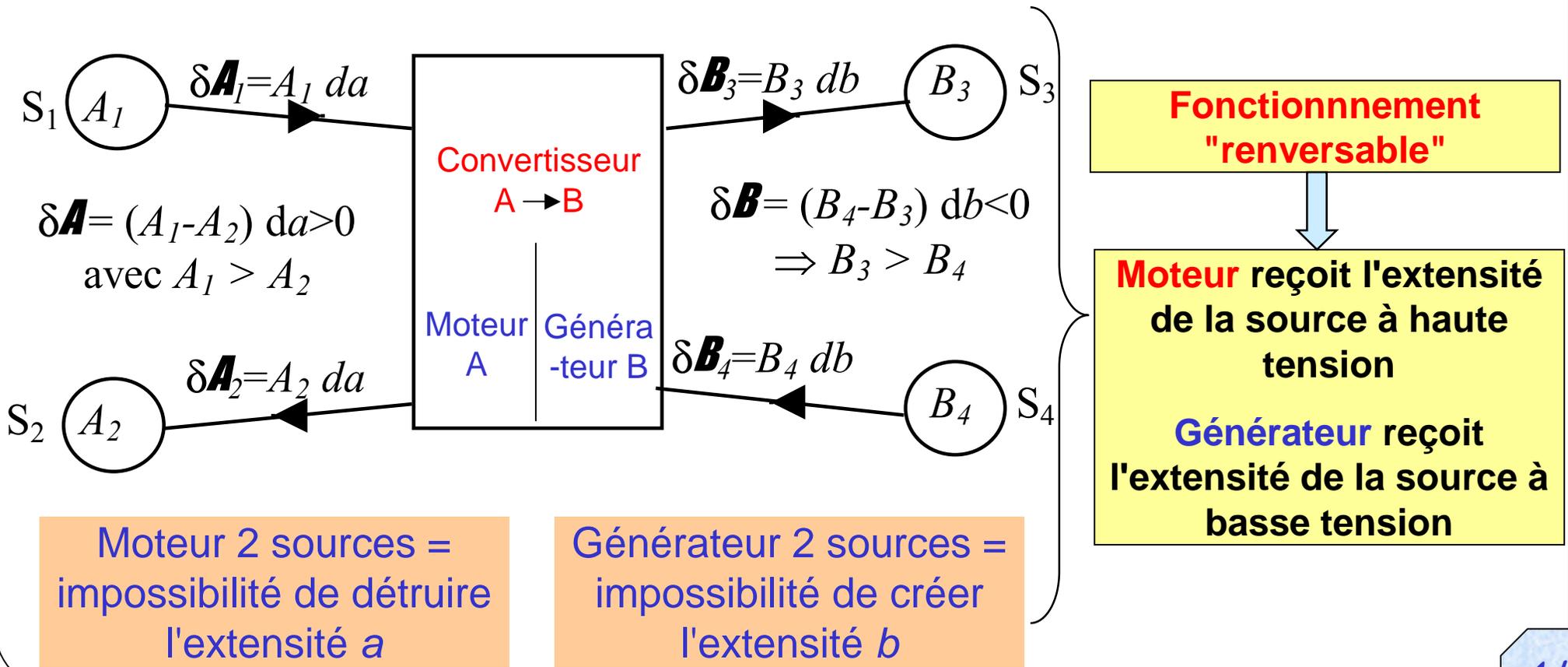
Convertisseur électro- thermique

Machine frigorifique (ou pompe à chaleur) Générateur thermique **ditherme**



Convertisseur d'énergie à 4 sources - conservation des extensivités

convertisseur = système **thermodynamique** particulier qui travaille de manière **cyclique** avec au moins deux formes d'énergie **A** et **B** (ni accumulation d'énergie, ni accumulation d'extensité)



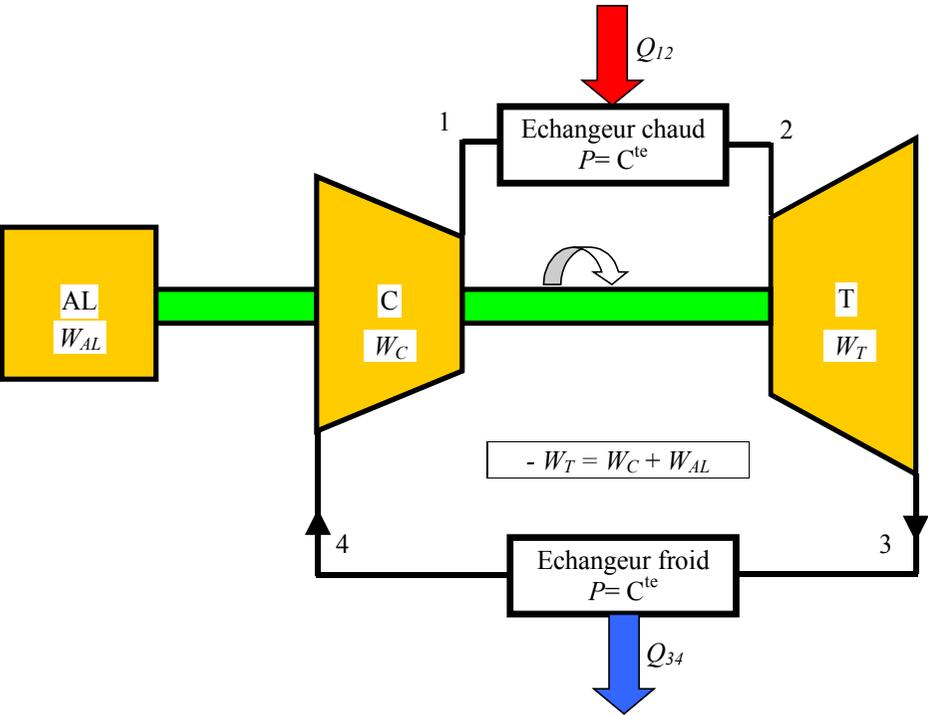
*Fonctionnement cyclique des systèmes de
conversion d'énergie*

Cycles mécaniques

Cycles thermodynamiques

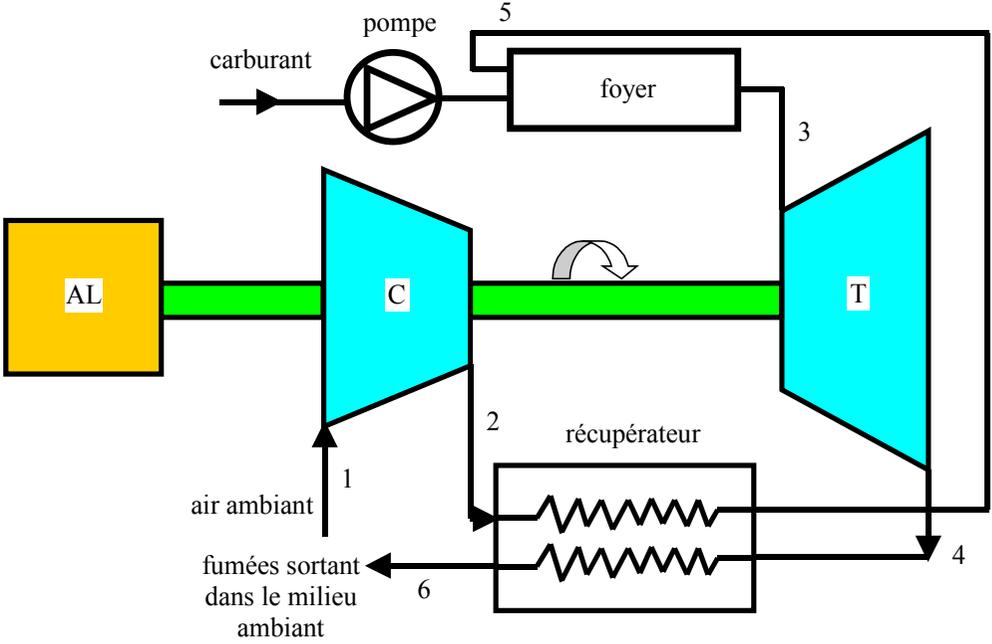
Installation motrice à gaz - Turbine à gaz et Turbine à combustion

Fonctionnement cyclique mécanique et thermodynamique



Il faut refroidir avant de réchauffer

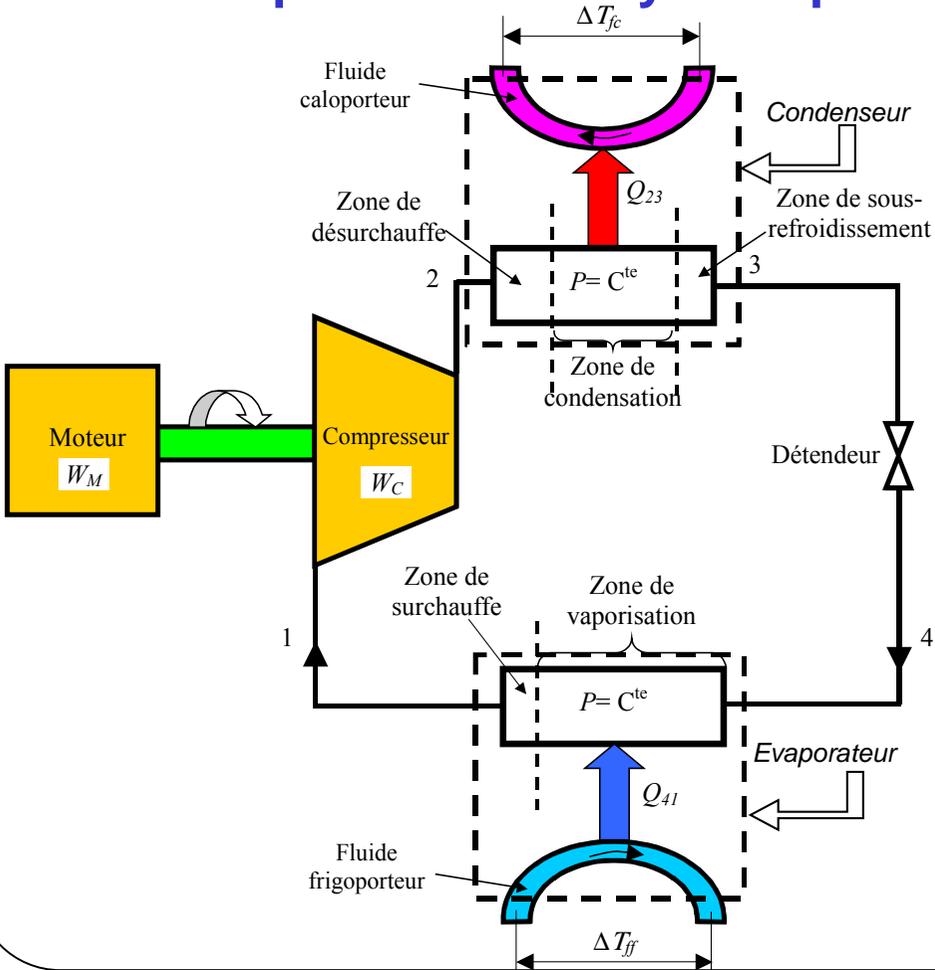
Fonctionnement cyclique mécanique – circuit ouvert



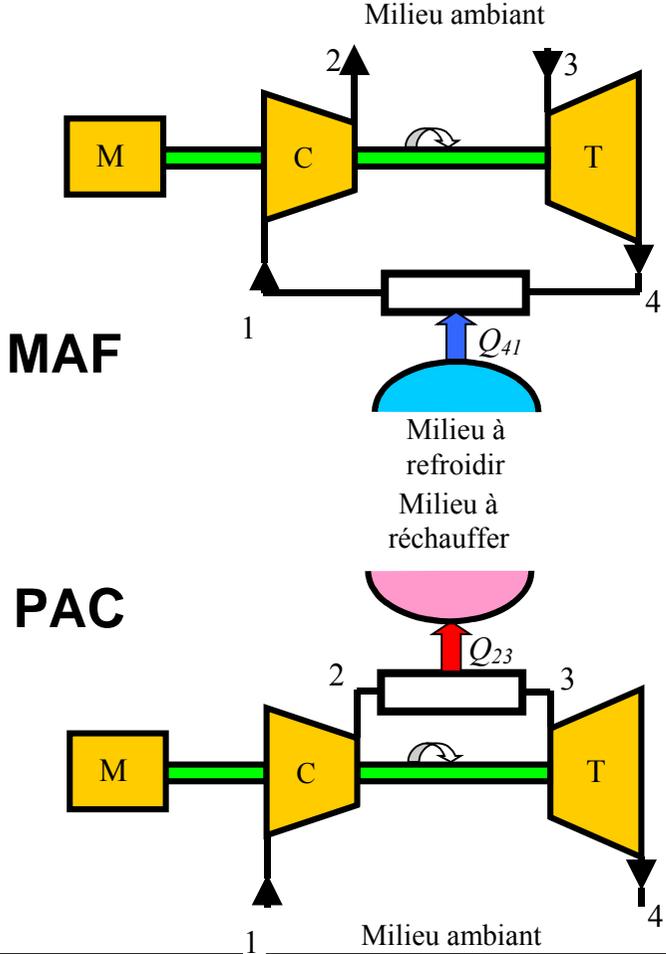
Un apport énergétique suffit

Générateurs thermiques – Machine frigorifique ou Pompe à chaleur

Fonctionnement cyclique mécanique et thermodynamique

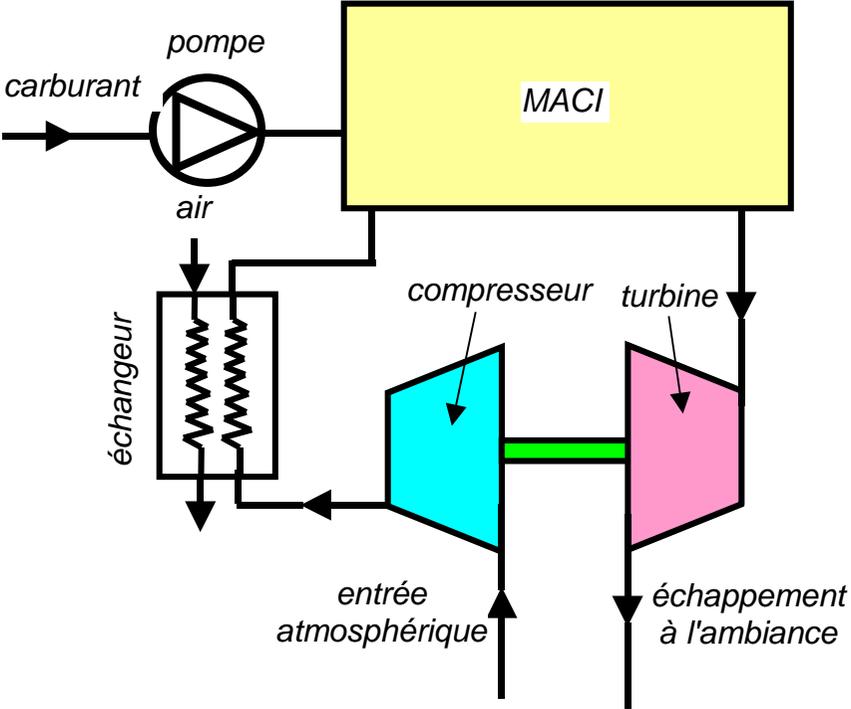


Fonctionnement cyclique mécanique – circuit ouvert



Moteur alternatif à combustion interne

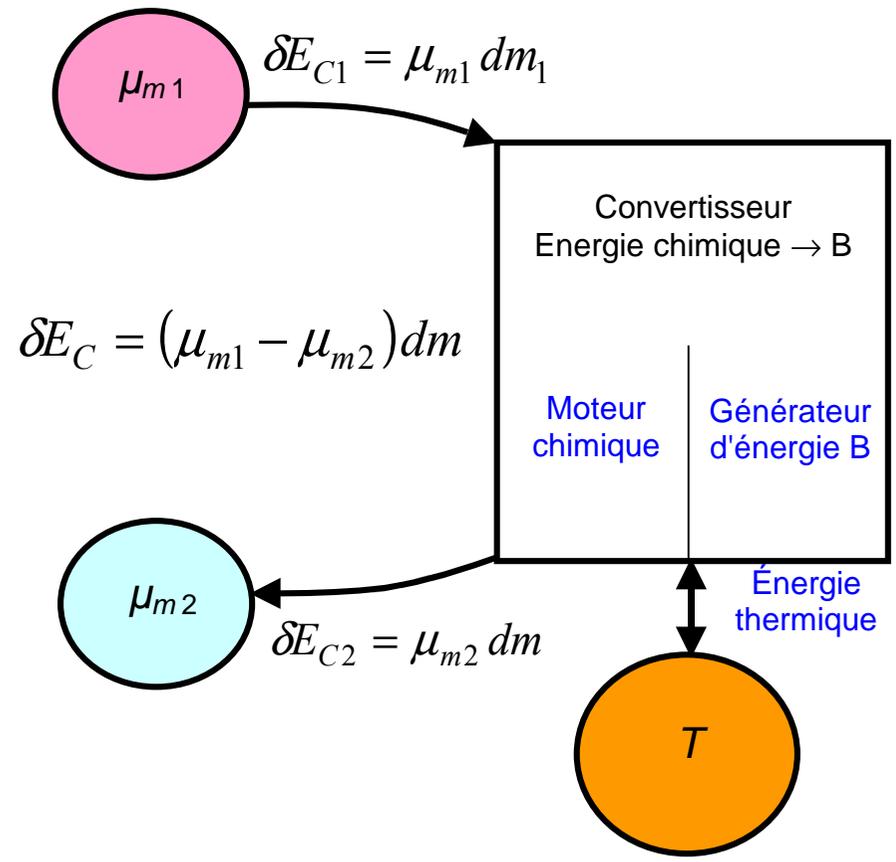
Fonctionnement cyclique mécanique – circuit ouvert



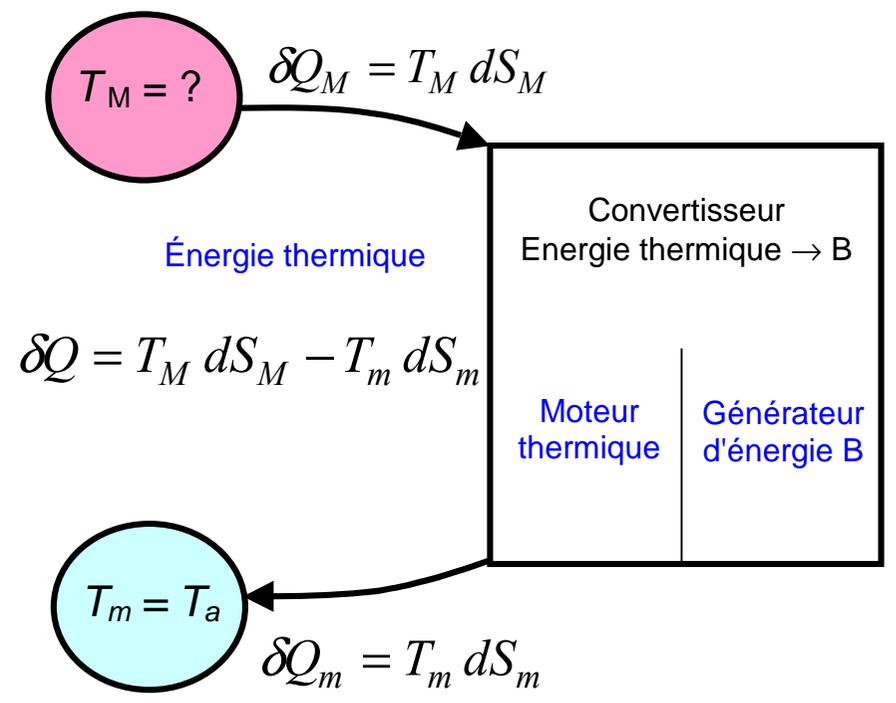
apport d'énergie chimique (combustible)

Convertisseurs thermo-mécaniques à cycles ouverts

Énergie chimique du fluide



Systeme équivalent

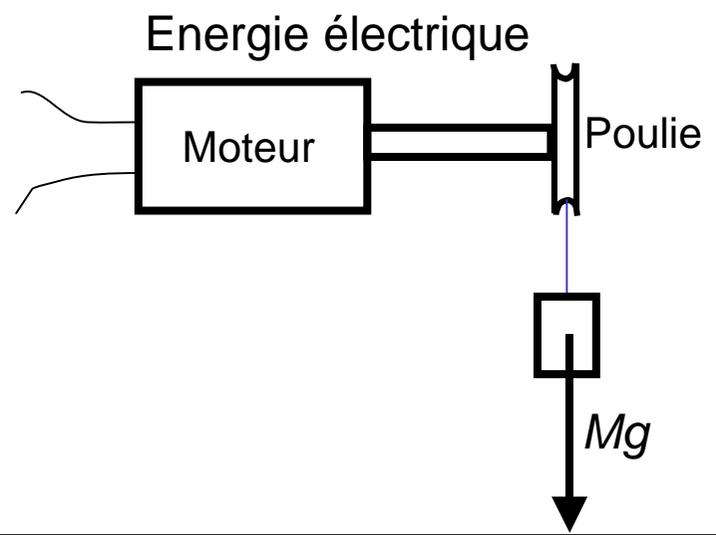
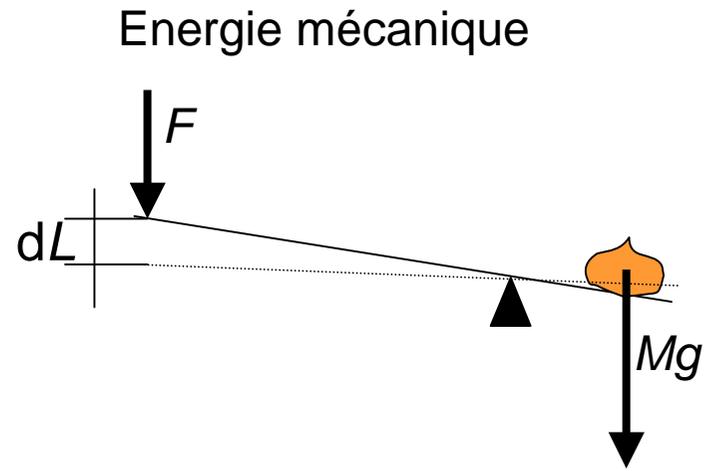


Energie "noble" et énergie "dégradée"

Exergie - Anergie

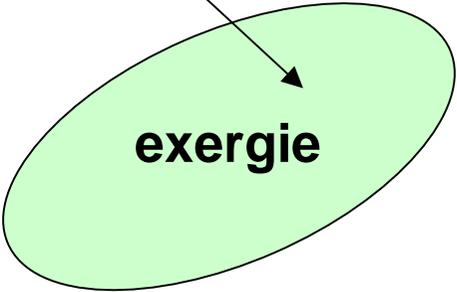
Définition de l'exergie d'un flux énergétique

Le **contenu exergétique** d'une **quantité d'énergie échangée** quelconque est la part **maximum** de cette énergie qui peut être convertie en énergie mécanique avec une référence au milieu ambiant.

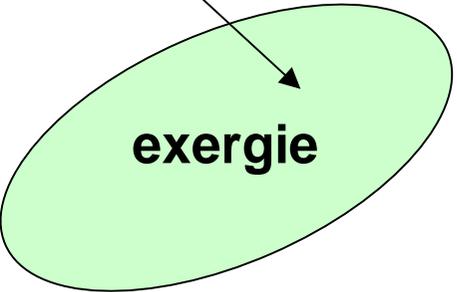


Énergie - Exergie - Anergie

Énergie mécanique

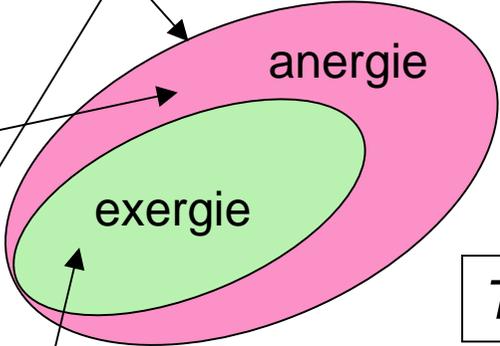


Énergie électrique

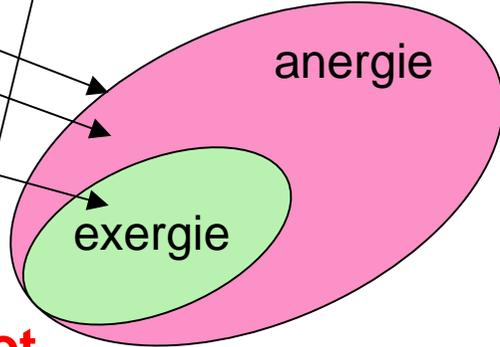


Énergie thermique

$Q T_a / T = T_a S$



$Q (1 - T_a / T)$



Facteur de Carnot

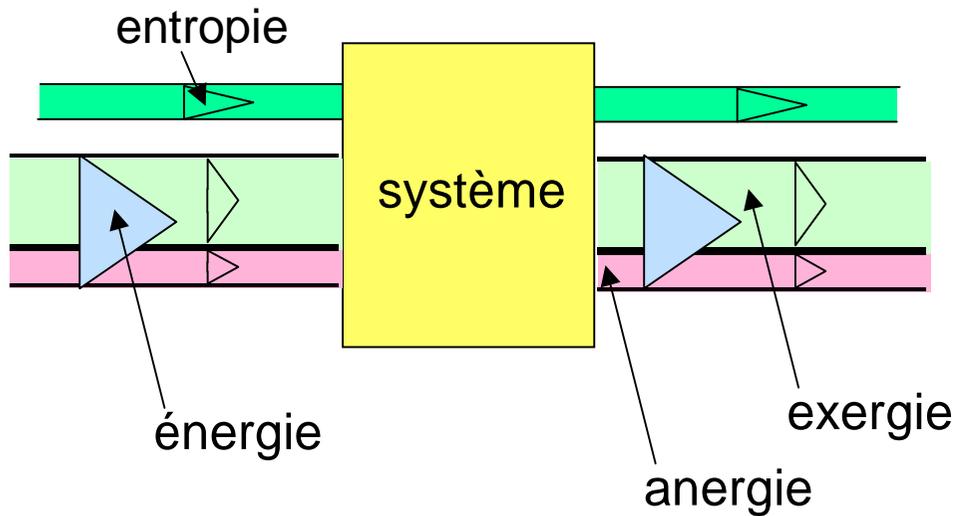
Remarques : **anergie** : toujours du même signe que l'énergie thermique et **liée à l'entropie par un facteur constant**

exergie : même signe si $T > T_a$; signe contraire si $T < T_a$



Echanges énergétiques d'un système en régime permanent

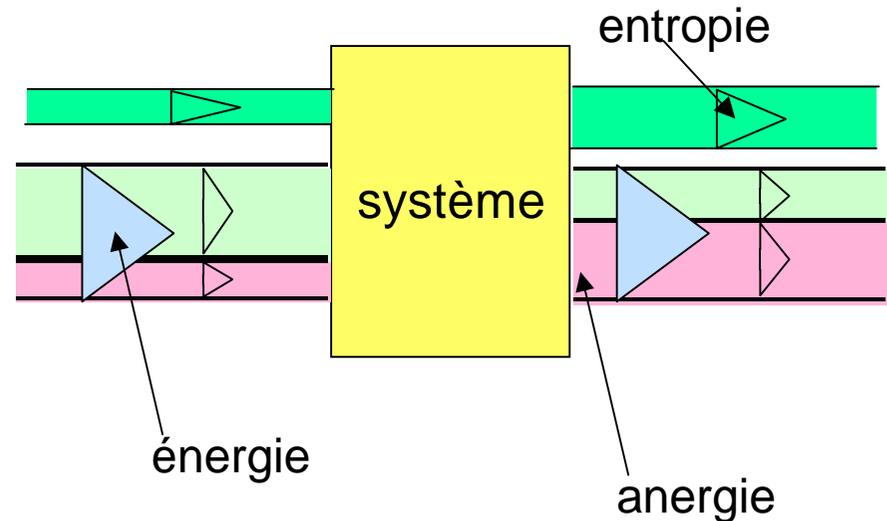
Transformation réversible



Conservation de l'énergie
Conservation de l'exergie
et de l'anergie

$$\eta_{ex} = 1$$

Transformation irréversible

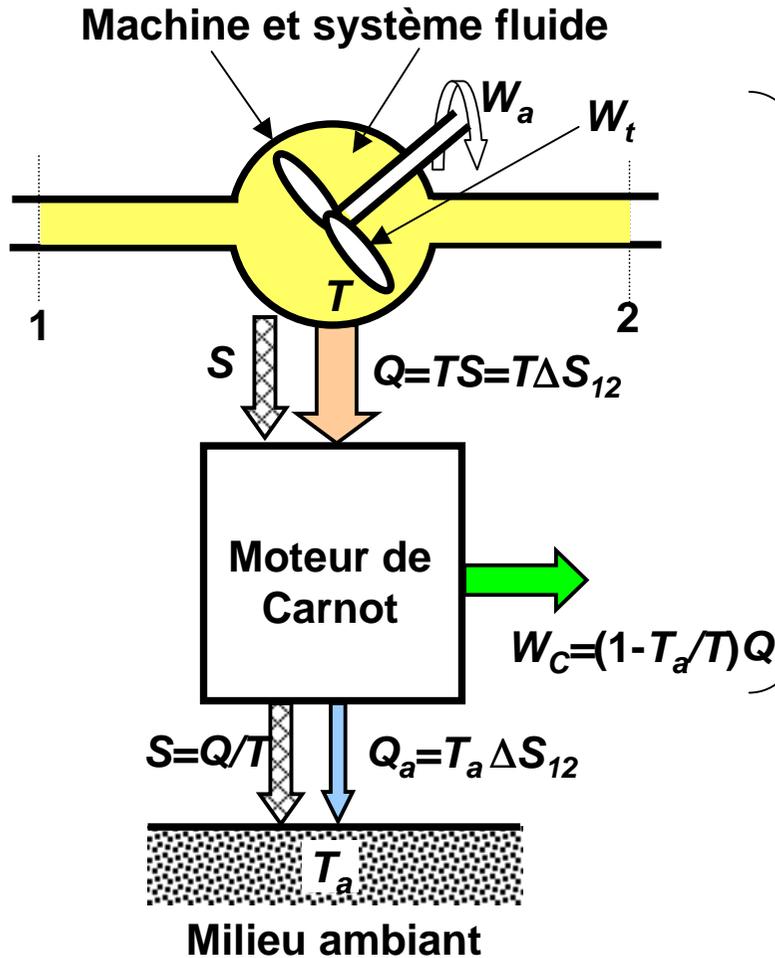


Conservation de l'énergie
Transformation d'exergie
en anergie

$$\eta_{ex} < 1$$



Variation d'exergie d'un système fluide traversant une machine



La variation d'**exergie** du **système fluide** qui évolue de l'état 1 à l'état 2 (en équilibre avec le milieu ambiant) est égale au **travail maximum** (en **opération réversible**) qu'il peut fournir directement (ici le « **travail technique** » w_t) auquel il convient d'ajouter le **travail fourni par un moteur de Carnot** (w_C) qui « récupère » la **chaleur Q** cédée par le moteur

$$\Delta Ex = W_M = W_t + W_C$$

$$W_t + Q = \Delta H_{t12}$$

$$\Delta Ex_{12} = \Delta H_{t12} - Q + Q(1 - T_a/T) = \Delta H_{t12} - QT_a/T = \Delta H_{t12} - T_a \Delta S_{12}$$

$$\Delta ex_{12} = \Delta h_{t12} - T_a \Delta s_{12}$$

Fonction d'état

L'**anergie** du **système fluide** correspond à la quantité de chaleur Q_a rejetée dans le milieu ambiant par le moteur de Carnot (non transformable en travail)

$$\Delta an_{12} = T_a \Delta s_{12}$$

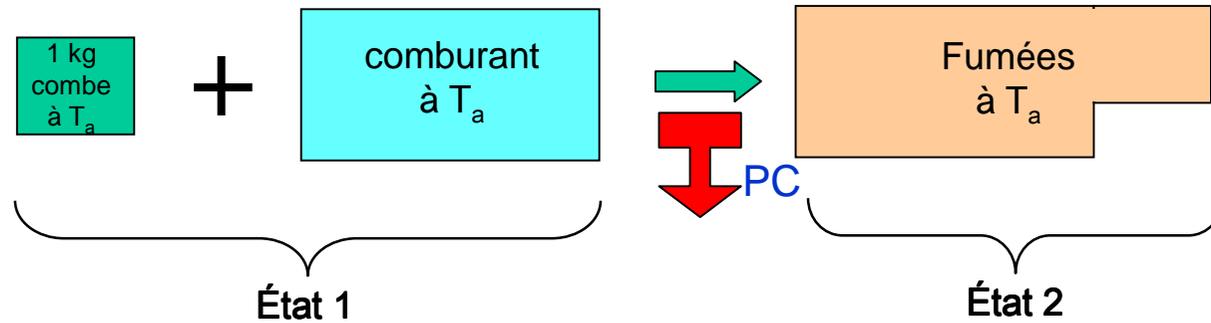
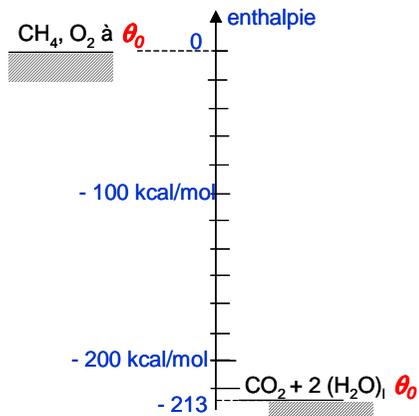
Fonction d'état

Exergie d'un mélange combustible

Exergie d'un système thermodynamique = fraction maximum de son énergie transformable en énergie mécanique

valable en **COMBUSTION**

Mélange combustible en équilibre avec le milieu ambiant \Rightarrow combustion complète (stoechiométrique) et fumées en équilibre avec le milieu ambiant



$$\Delta Ex_{12} = \Delta H_{t_{12}} - T_a \cdot \Delta S_{12} \begin{cases} \Delta H_{t_{12}} = -I_p \\ \text{et } \Delta Ex_{12} = -I_p - T_a \Delta S_{12} \end{cases}$$

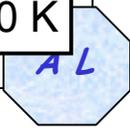
Pouvoir calorifique inférieur

$$Ex_m = I_p + T_a \Delta S_{12}$$

Exergie du mélange combustible à T_a et sous P_a

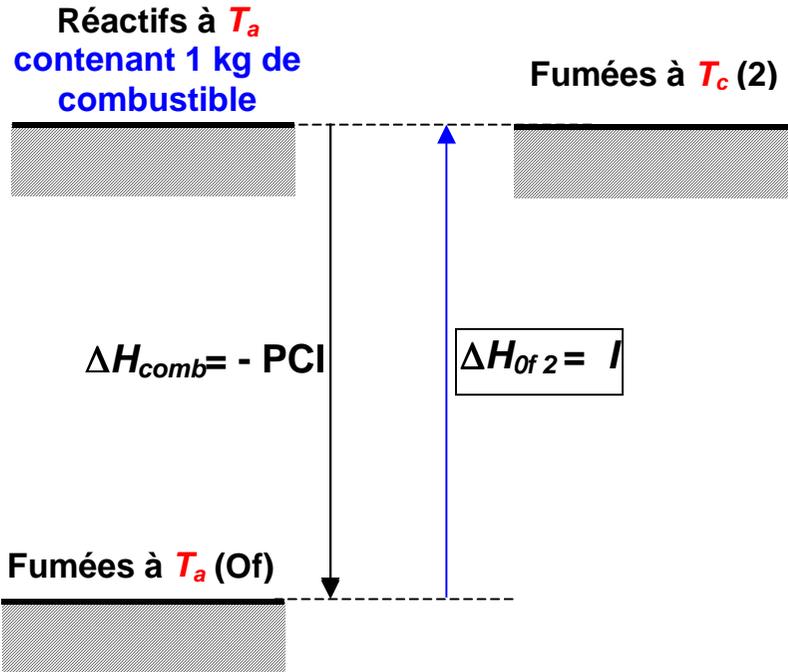
Exemple du CH_4 $\left\{ \begin{array}{l} I_p = 50 \text{ MJ/kg} \\ \Delta S = -15 \text{ kJ/kg.K} \Rightarrow T_a \Delta S = -4,4 \text{ MJ/kg} \end{array} \right\}$

$Ex_m = 45,6 \text{ MJ/kg} \approx I_p$ $T_{\text{sou.éq}} = 3350 \text{ K}$

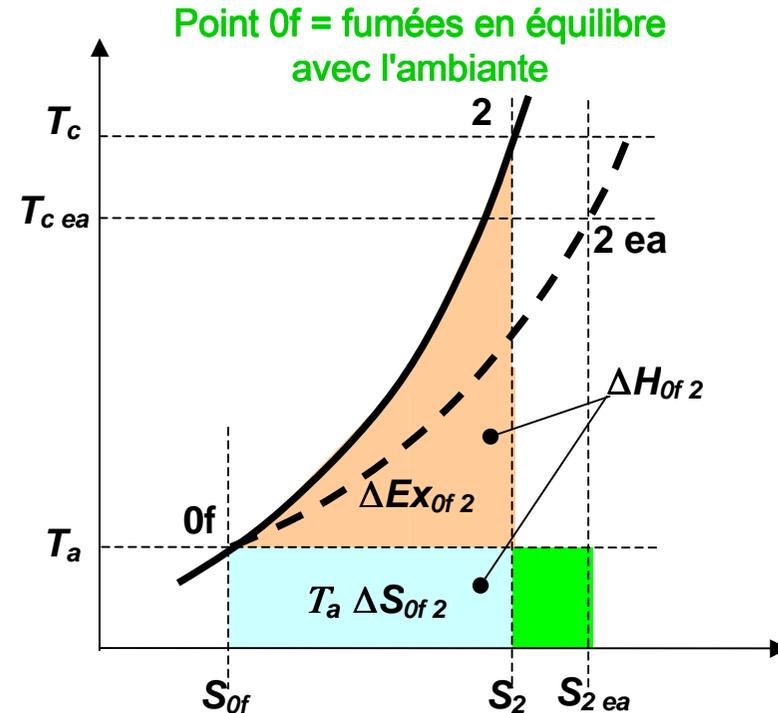


Irréversibilité de la combustion - Exergie des fumées "adiabatiques"

Combustion réelle



Fumées adiabatiques



$$\Delta EX_{of2} = EX_2 = EX_{\text{fumées adia}} = \Delta H_{of2} - T_a \Delta S_{of2} = I_P - T_a \Delta S_{of2} < EX_m = I_P + T_a \Delta S_{\text{comb à } T_a}$$

Irréversibilité de la combustion

$$EX_m - EX_{\text{fumées adia}} = T_a \Delta S_{\text{comb à } T_a} + T_a \Delta S_{of2}$$

Cas du CH_4 : 9,3 MJ/kg soit 20 % de l'exergie du combustible



ANALYSES ENERGETIQUES ET EXERGETIQUES

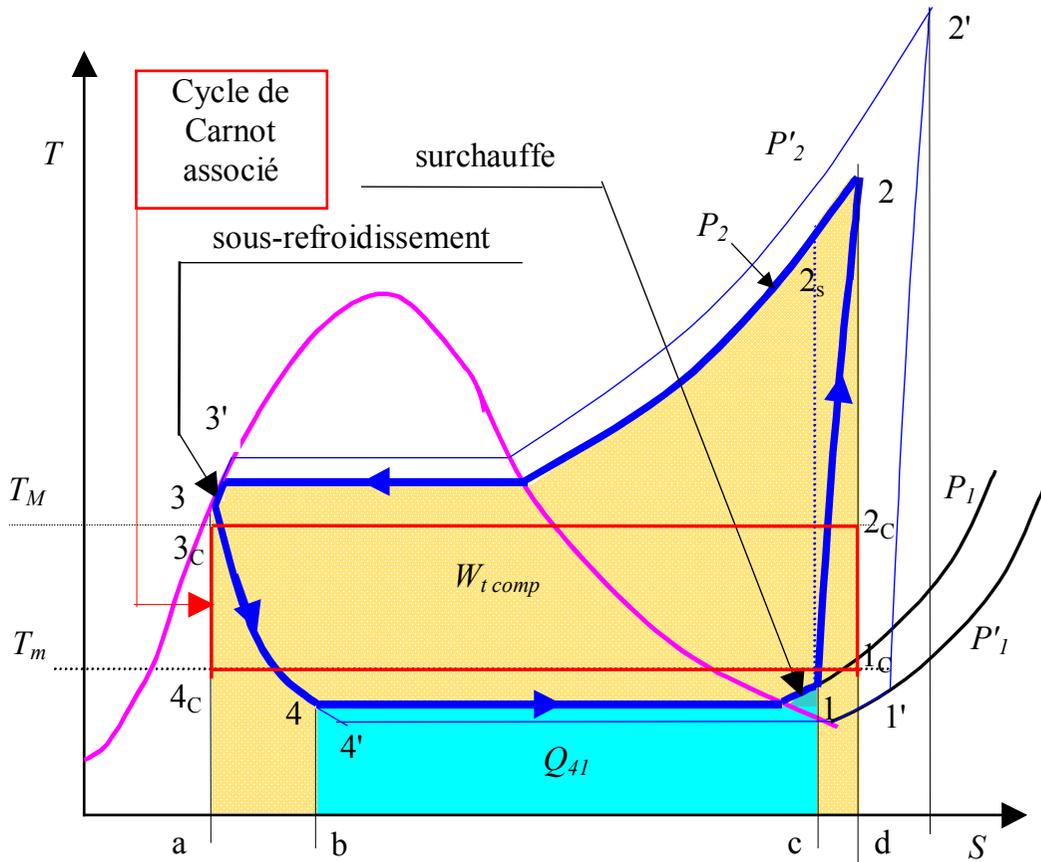
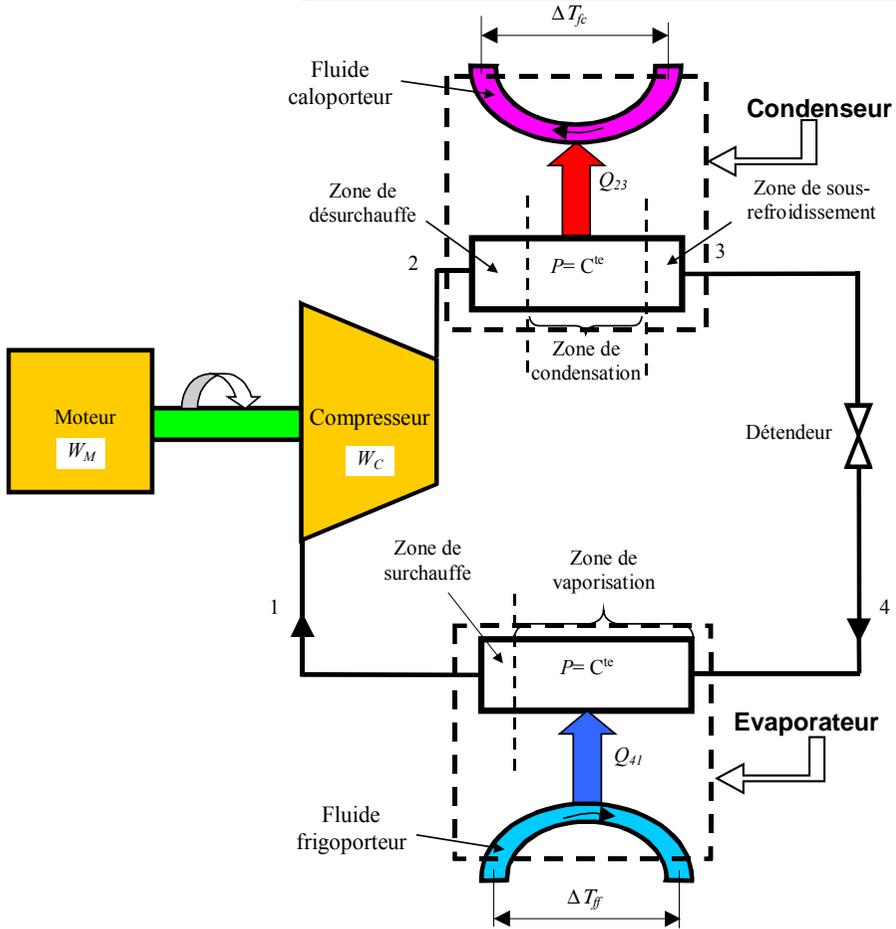
Rendements

•énergétique : $\eta_{en} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie utilisée}}$

•exergétique : $\eta_{ex} = \frac{\text{exergie utile}}{\text{exergie utilisée}}$

Problème : appréciation qualitative des termes "utile" et "utilisée"

Analyse globale - Machines frigorifiques et PAC



Rendements MF

$$COP = \frac{Q_m}{W_t} \quad \eta_{ex} = \frac{-Q_m(1 - T_a/T_m)}{W_t}$$

$$COP_C = \frac{T_m}{T_a - T_m} \quad \frac{COP}{COP_C} = \frac{Q_m}{W_t} \left(\frac{T_a}{T_m} - 1 \right) = \eta_{ex}$$

Rendements PAC

$$COP = -\frac{Q_M}{W_t} \quad \eta_{ex} = \frac{-Q_M(1 - T_a/T_M)}{W_t}$$

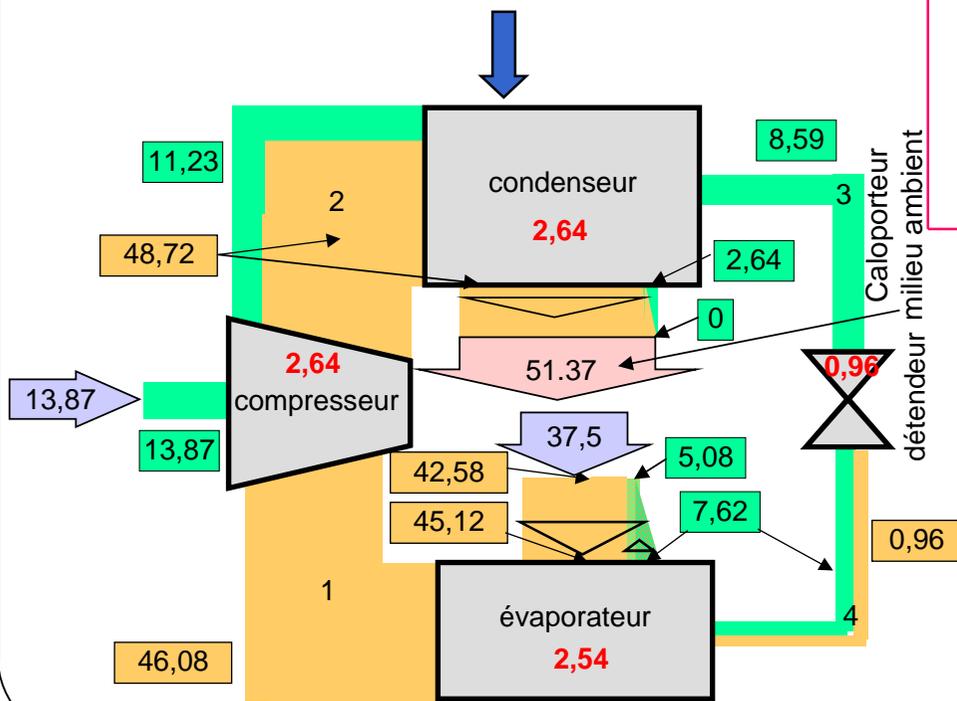
$$COP_C = \frac{T_M}{T_M - T_a} \quad \frac{COP}{COP_C} = -\frac{Q_M}{W_t} \left(1 - \frac{T_a}{T_M} \right) = \eta_{ex}$$

Analyse par composants

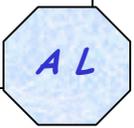
Bilan exergétique d'une machine frigorifique

Cas 1 : frigorigène - R 22 - température ambiante : 20 °C
 caloporteur à 20 °C ; frigoporteur à -15 °C -
 condensation à 30 °C ; évaporation à - 25 °C
 compression adiabatique ; rendement isentropique 0,75
 (unités : kcal/kg)

Cas 2 : frigorigène - R 22 - température ambiante : 20 °C
 caloporteur à 25 °C ; frigoporteur à -15 °C -
 condensation à 30 °C ; évaporation à - 25 °C
 compression adiabatique ; rendement isentropique 0,75
 (unités : kcal/kg)

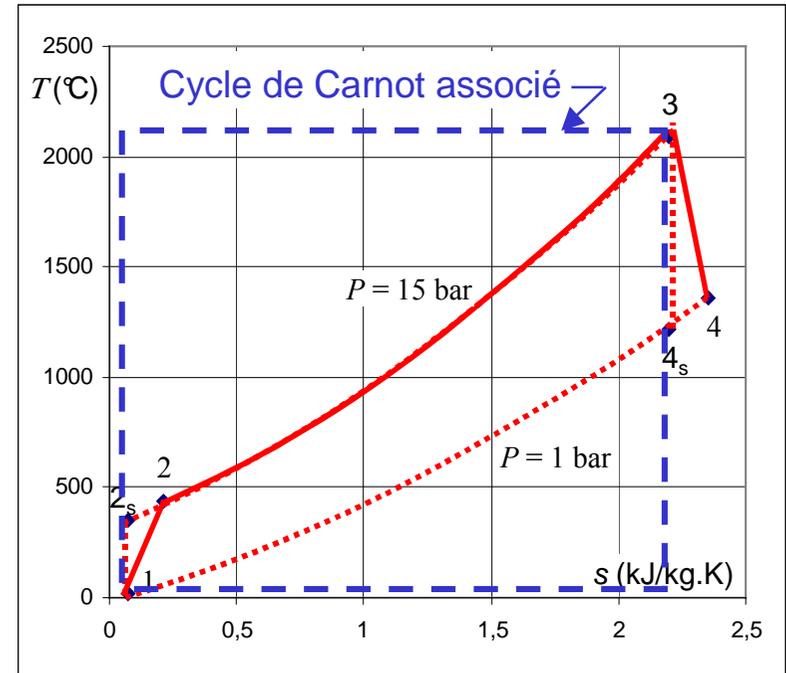
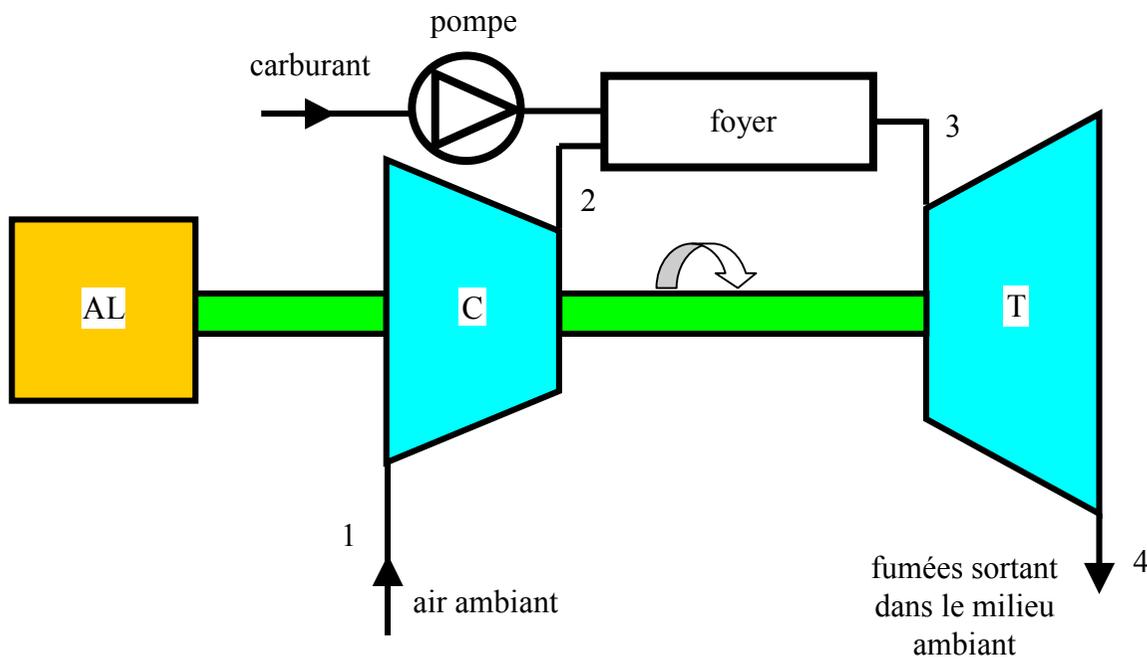


Totalité du système	η_{ex} (%)	COP	COP_C	COP/COP_C
	37	2,7	7,38	0,37
Analyse par composant	ex_d (kcal/kg)	η_{ex} (%)	$ex_d/énergie$ (%)	
compresseur	2,64	81	19,0	
condenseur	2,64	0	5,1	
évaporateur	2,54	67	6,8	
détendeur	0,96	0	∞	
Totalité du système	η_{ex} (%)	COP	COP_C	COP/COP_C
	37	2,7	6,45	0,42
Analyse par composant	ex_d (kcal/kg)	η_{ex} (%)	$ex_d/énergie$ (%)	
compresseur	2,64	81	19	
condenseur	1,78	33	3,0	
évaporateur	2,54	67	6,8	
détendeur	0,94	0	∞	



Application aux moteurs à combustion interne - TAC

Méthane / air (**richesse unité**)
 Température d'entrée compresseur = température ambiante = 20 °C
 Taux de compression : 15 ; rendement compresseur : 0,8 ; rendement turbine : 0,85



Rendements TAC

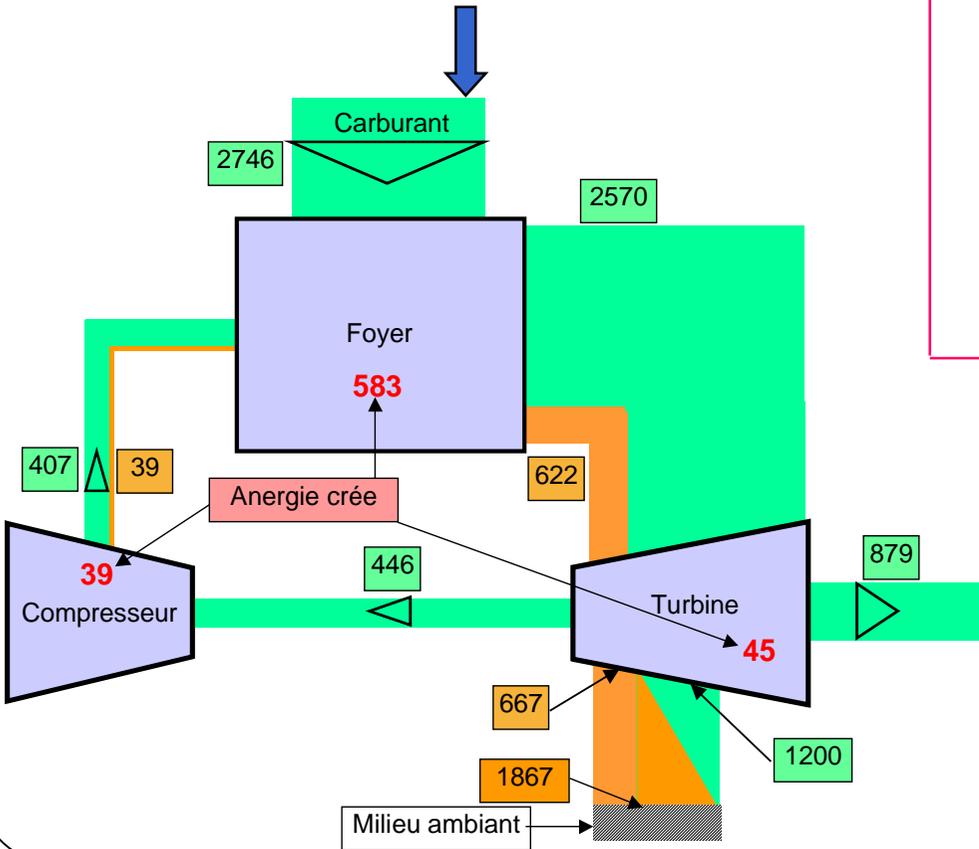
$$\eta = -\frac{W_t}{I_P} \quad \eta_{ex} = -\frac{W_t}{Ex_{mcomb}} \approx -\frac{W_t}{I_P} \quad \eta_C = \frac{T_M - T_a}{T_M} \quad \frac{\eta}{\eta_C} = -\frac{W_t}{I_P} \frac{T_M}{T_M - T_a} \neq \eta_{ex} \quad \frac{\eta}{\eta_C} = -\frac{W_t}{I_P} \frac{T_\infty}{T_\infty - T_a} = \eta_{ex}$$



Bilan exergetique d'une turbine à combustion

Cas 1 : méthane / air (richesse unité)
 Température d'entrée compresseur = température ambiante = 20 °C
 rendement compresseur : 0,8 rendement turbine : 0,85
 (en kJ/kg de mélange)

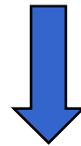
Cas 2 : méthane / air (richesse 0,5)
 Température d'entrée compresseur = température ambiante = 20 °C
 rendement compresseur : 0,8 rendement turbine : 0,85
 (en kJ/kg de mélange)



Totalité du système	η_{ex} (%)	η_{en} (%)	$(\eta_{en C})_{T_{gaz}}$ (%)	$\eta_{en} / (\eta_{en C})_{T_{gaz}}$
	32	32	88	0,37
Analyse par composant	composant	ex_d (kJ/kg)	η_{ex} (%)	$ex_d/énergie$ (%)
	compresseur	39	91,2	8,7
	foyer	583	81,8	21,2
	turbine	45	98,5	3,4
	échappement	1200	0	∞
Totalité du système	η_{ex} (%)	η_{en} (%)	$(\eta_{en C})_{T_{gaz}}$ (%)	$\eta_{en} / (\eta_{en C})_{T_{gaz}}$
	29,1	29,1	81,9	0,35
Analyse par composant	composant	ex_d (kJ/kg)	η_{ex} (%)	$ex_d/énergie$ (%)
	compresseur	39	91,2	8,9
	foyer	394	78,2	27,9
	turbine	44	96,9	5,0
	échappement	500	0	∞



- ❑ Analyse exergetique = couplage premier et second principe permet une **optimisation technique**
- ❑ Nécessité industrielle d'une implication économique dans les choix

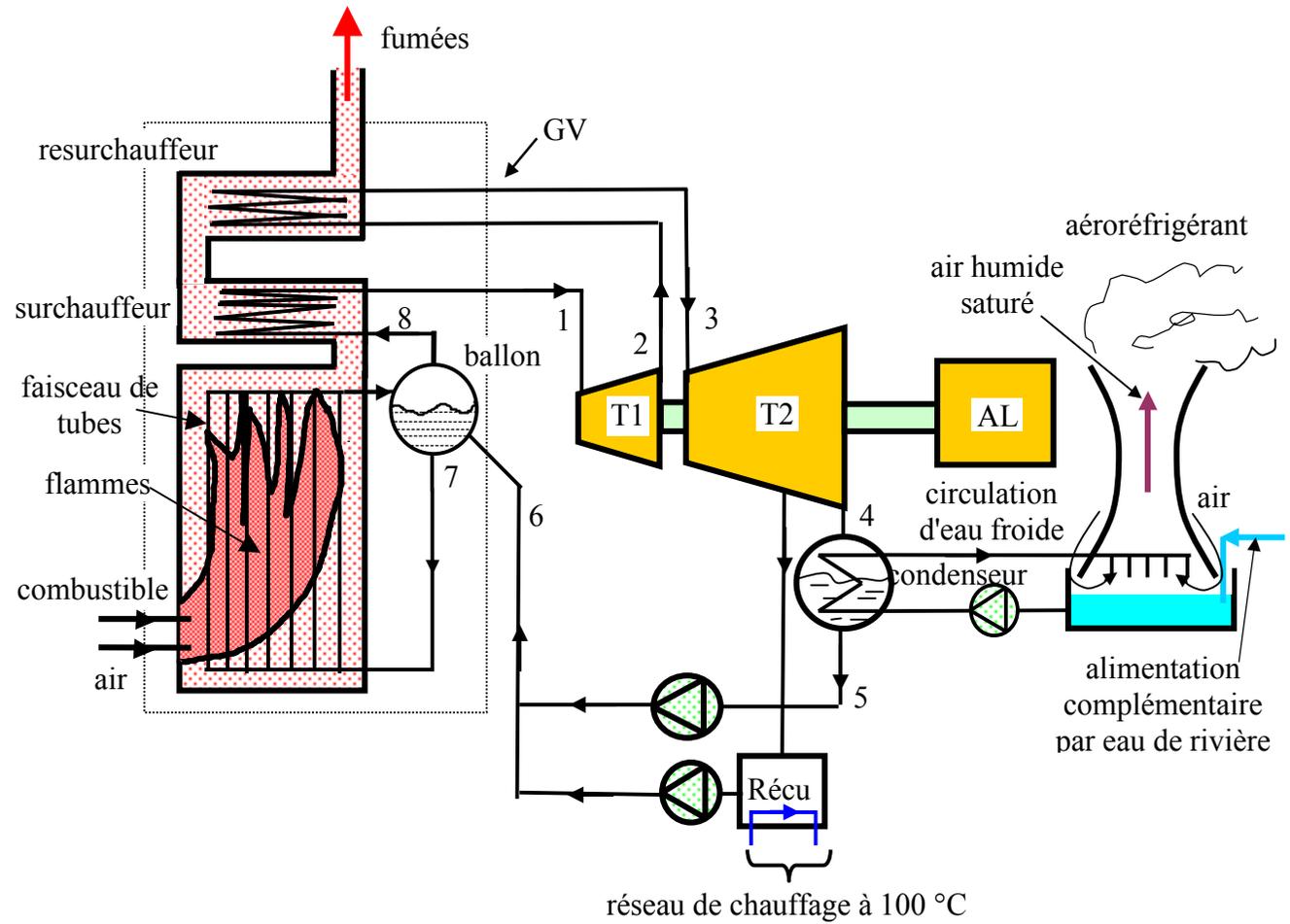


THERMO-ECONOMIE

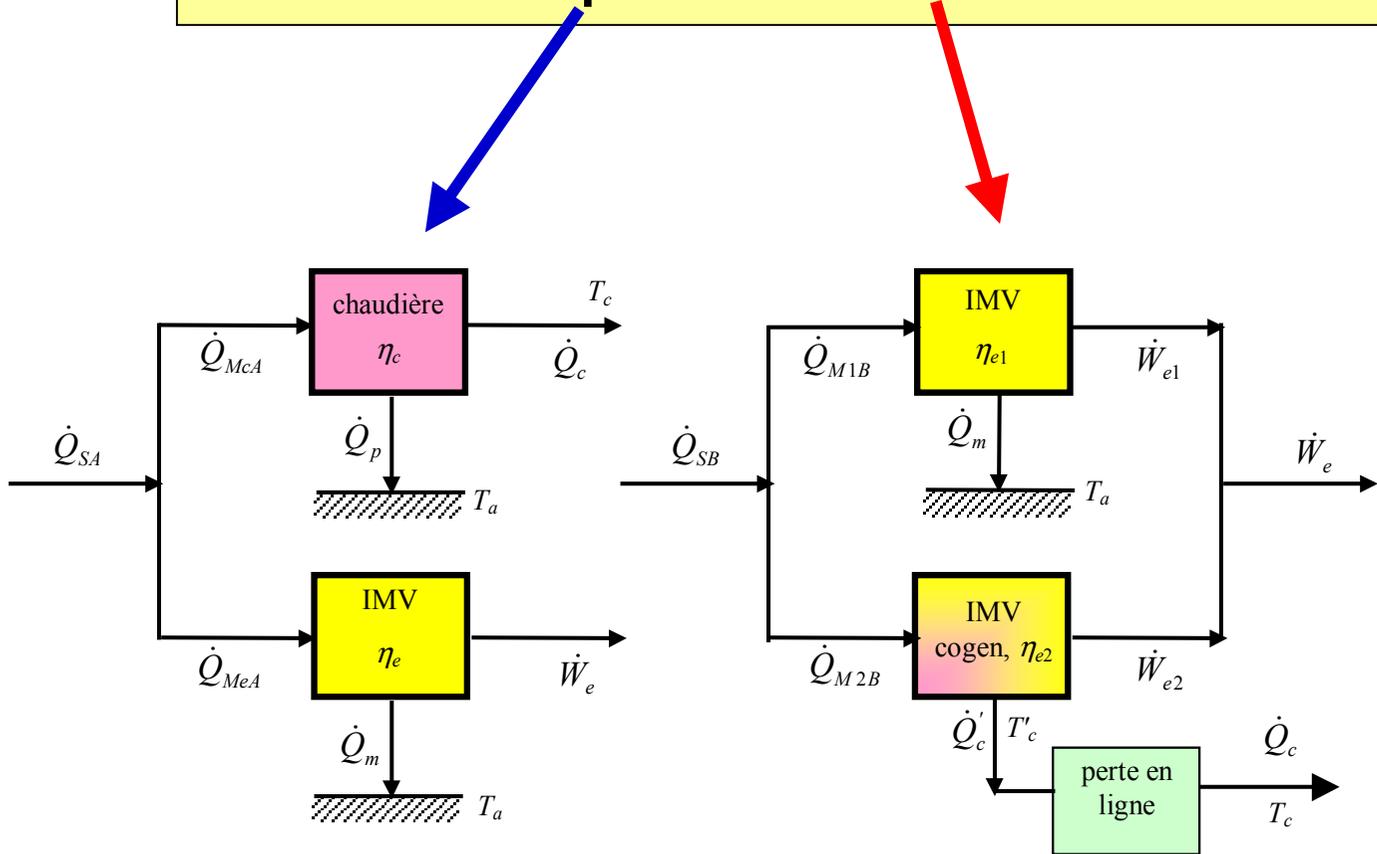


**Analyse basique de l'intérêt énergétique, économique et exergetique
de la cogénération**

Cogénération à partir d'un soutirage sur une Installation motrice à vapeur



Production séparée ou combinée de chaleur et d'électricité



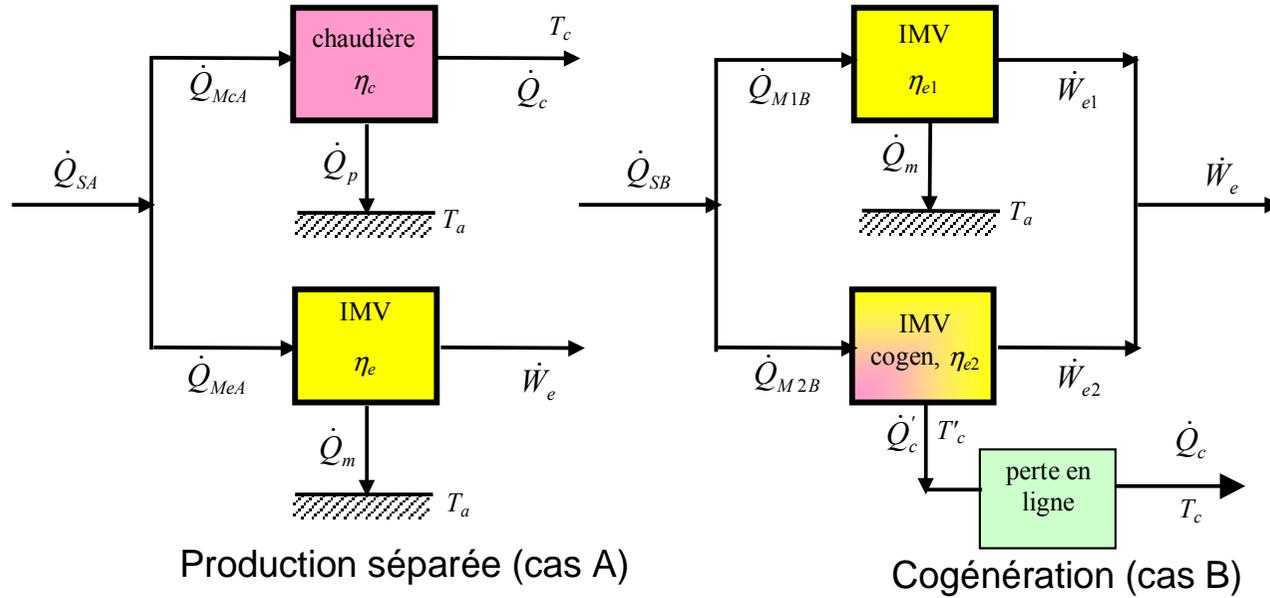
Coefficient de production électrique

$$CE = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}_c}$$

(CE global pour la France : de l'ordre de 1)



Intérêt énergétique de la cogénération



Coefficient de production électrique

$$CE = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}_c}$$

(CE global pour la France : de l'ordre de 1)

$\eta_c = 0,9$; $\eta_e = \eta_{e1} = 0,469$;
 $\eta_{e2} = 0,343$; $\eta_{pq} = 0,9$

Production séparée (cas A)

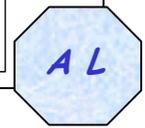
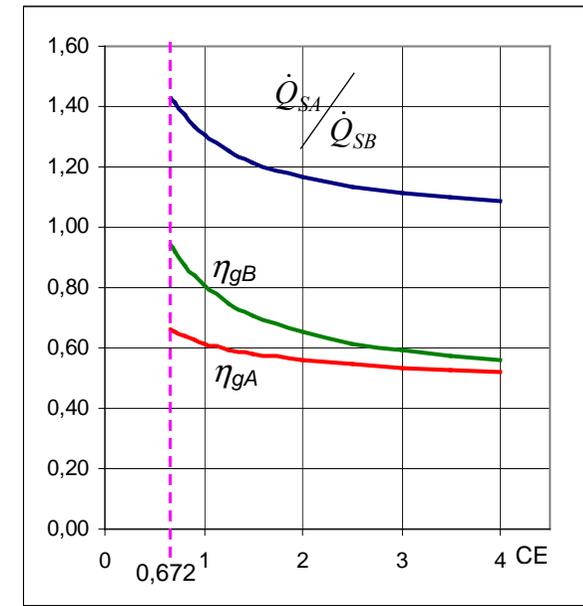
Cogénération (cas B)

Paramètres étudiés : \dot{Q}_S et

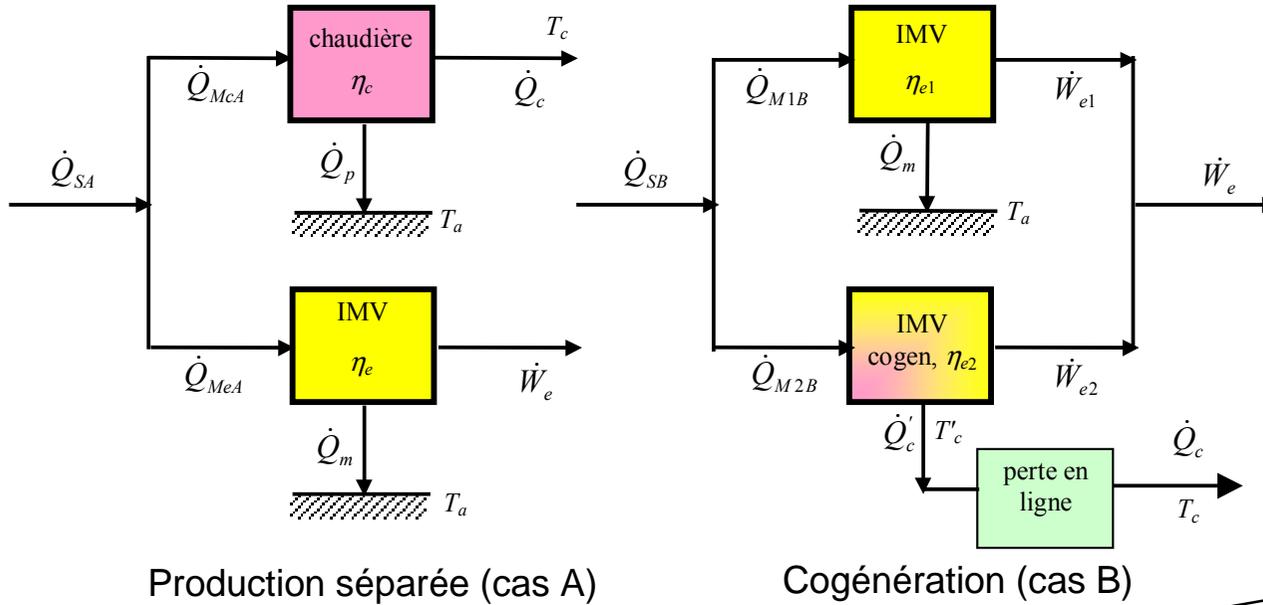
$$\eta_g = \frac{\dot{W}_e + \dot{Q}_c}{\dot{Q}_S} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_S} (1 + CE)$$

(A)
$$\begin{cases} \dot{Q}_{SA} = \dot{Q}_c \left(\frac{1}{\eta_c} + \frac{CE}{\eta_e} \right) \\ \eta_{gA} = \frac{1 + CE}{\frac{1}{\eta_c} + \frac{CE}{\eta_e}} \end{cases}$$

(B)
$$\begin{cases} \dot{Q}_{SB} = \dot{Q}_c \left[\frac{1}{\eta_{e1}\eta_{pq}} \frac{\eta_{e1} - \eta_{e2}}{1 - \eta_{e2}} + \frac{CE}{\eta_{e1}} \right] \\ \eta_{gB} = \frac{1 + CE}{\left[\frac{1}{\eta_{e1}\eta_{pq}} \frac{\eta_{e1} - \eta_{e2}}{1 - \eta_{e2}} + \frac{CE}{\eta_{e1}} \right]} \end{cases}$$



Analyse économique



Hypothèse

• prix de revient de l'énergie = prix de l'énergie primaire chargé des coûts d'investissement et d'exploitation qq soit le procédé (identique pour tous les procédés)

Cas A :

$Pr_c = Pr_{ep} / \eta_c$ par unité d'énergie pour la chaleur

$Pr_e = Pr_{ep} / \eta_e$ par unité d'énergie pour l'électricité

Cas B : deux solutions

Solution 1 : chaleur (= sous-produit) vendue au coût marginal

Solution 2 : électricité (= sous-produit) vendue au coût marginal

Électricité vendue au prix du marché : $(Pr_e)_1 = Pr_{ep} / \eta_e$

Chaleur vendue au prix du marché : $(Pr_c)_2 = Pr_{ep} / \eta_c$

Prix de vente de la chaleur tel que la prix de vente total couvre les frais

$$Pr_{ep} \dot{Q}_{SB} = (Pr_c)_1 \dot{Q}_c + (Pr_e)_1 \dot{W}_e$$

Prix de vente de l'électricité tel que la prix de vente total couvre les frais

$$Pr_{ep} \dot{Q}_{SB} = (Pr_c)_2 \dot{Q}_c + (Pr_e)_2 \dot{W}_e$$

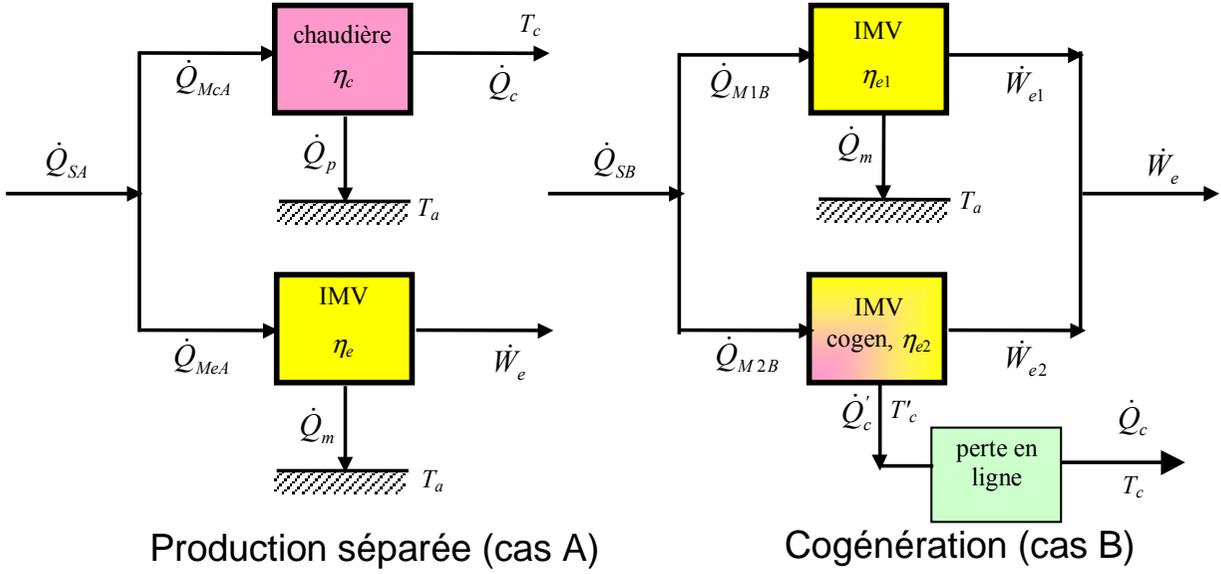
soit :

$$(Pr_c)_1 = \left(\frac{\dot{Q}_{SB}}{\dot{Q}_c} - \frac{CE}{\eta_e} \right) Pr_{ep}$$

soit :

$$(Pr_e)_2 = \frac{1}{CE} \left(\frac{\dot{Q}_{SB}}{\dot{Q}_c} - \frac{1}{\eta_c} \right) Pr_{ep}$$

Analyse exergo- économique



Couple l'étude exergétique des procédés et leur analyse économique

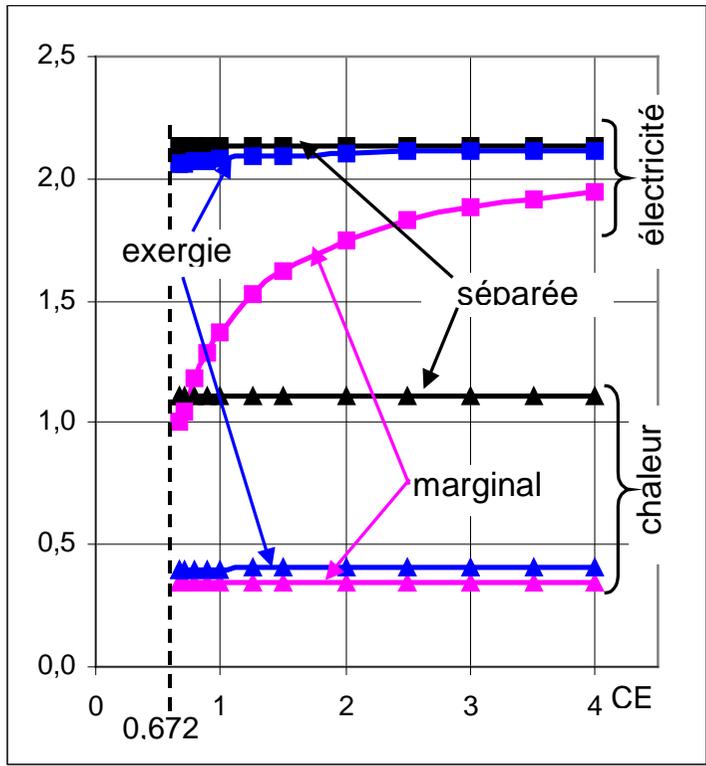
Le coût exergétique global du procédé est fixé à partir du coût chargé de l'énergie primaire consommée

$$Pr_{ep} \dot{Q}_{SB} = Pr_{ex} \left[\dot{W}_e + \dot{Q}_c \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right) \right]$$

alors, le prix de vente des énergies doit être :

$$(Pr_e)_3 = Pr_{ex} = \frac{\dot{Q}_{SB}}{\dot{Q}_c} \left[\frac{1}{CE + \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right)} \right] Pr_{ep}$$

$$(Pr_c)_3 = \left(1 - \frac{T_a}{T_c} \right) Pr_{ex}$$



CONCLUSION

- ❑ Importance du choix de la **température de référence de Carnot**
 - * moteur à combustion
 - * machine frigorifique
- ❑ Applications multiples du **concept d'exergie** (rendements, pertes, ratios exergie/énergie,...)
- ❑ Nécessité industrielle d'un couplage entre les analyses économiques et techniques : **exergo-économie**
- ❑ Pour quelle **optimisation** ?
 - * **Développement durable** ? NON

$\frac{dS}{dt} > 0$ création d'entropie ; irréversible

$\frac{dS}{dt} = 0$ conservation de l'entropie ; réversible

* Développement **soutenable** ? OUI mais problème : quantification de "soutenable" ; puissance exergétique détruite - puissance énergétique - coût unitaire puissance - ... autres paramètres (GES, etc.)