

# **DE L'UTILITE DE L'EXERGIE : UN EXEMPLE LA COGENERATION CHAUDE**

***Journée SFT 20 Mars 2008, ENSTA, Paris***

***Journée du groupe thématique : ENERGETIQUE  
(Sous groupe thermodynamique)***

**Michel Feidt - Damien Descieux**



**Damien Descieux**

2 avenue de la Forêt de Haye  
BP 160  
54504 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Email: [Damien.Descieux@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:Damien.Descieux@ensem.inpl-nancy.fr)

Tel: +33 (0)3 83 59 55 92

Fax: +33 (0)3 83 59 55 51



**Michel Feidt**

2 avenue de la Forêt de Haye  
BP 160  
54504 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Email: [Michel.Feidt@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:Michel.Feidt@ensem.inpl-nancy.fr)

Tel: +33 (0)3 83 59 57 34

Fax: +33 (0)3 83 59 55 51

**Nancy-Université**  
Université  
Henri Poincaré

# Plan de la présentation

1. Introduction
2. Le contexte : ENERGIES et RECHERCHES
3. La thermodynamique : potentiel et usage
4. Illustration : étude de cas de cogénération du simple au complexe
5. Conclusion - perspective de la pertinence de l'exergie

# 1 Introduction

## L'EXERGIE, UNE IDÉE NEUVE ?

- Gouy (Stodola) 1889
- Darrieus 1930  
plus récemment
- P. Le Goff
- B. Spinner
- Nouvelles Méthodes en Thermodynamique  
2 Journées : 25 avril 2001, 5 décembre 2001
- CARNOT  
Communauté d'Analyse et de Recherche sur les Nouvelles Orientations de la Thermodynamique

## 2 Contexte Énergies et recherches

- Fin des énergies bon marché (économie)
- Fin des énergies "sales" (environnement)

### ● Différents problèmes

- de civilisation (société) : dont formation
- technique et technologique : approche de l'ingénieur
- scientifique : dont recherche

### ● Diverses approches

- du mécanisme (processus) approche particularisée    ↳ discipline
- au système ou procédé approche globalisée        ↳ pluridisciplinaire

un outil privilégié :

**la THERMODYNAMIQUE**

(différent de la thermostatique qu'elle prolonge)

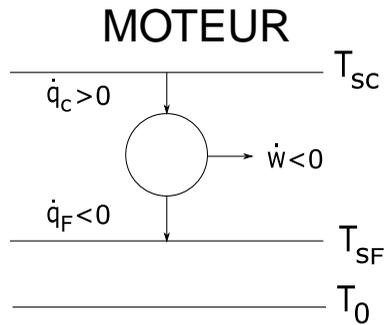
un outil fédérateur vers

**L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE**

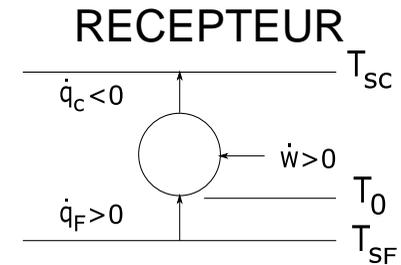
# 3 l'outil thermodynamique : Exemples-Hypothèses

- Machines thermomécaniques
  - machines à froid, pompes à chaleur, climatiseurs, thermofrigopompes
  - moteurs thermiques
    - combustion interne, externe
    - alternatif, à flux
  - systèmes combinés, hybrides
- Fonctionnement en régime dynamique stationnaire
- Cogénération chaude, froide

# 3 l'outil thermodynamique : concept et conventions



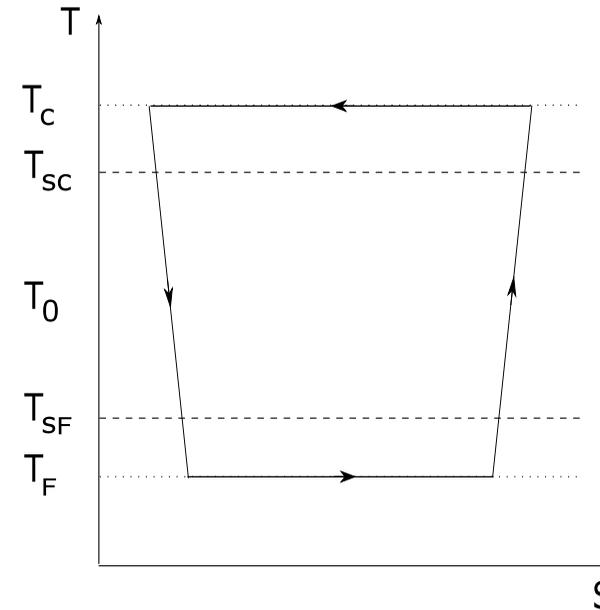
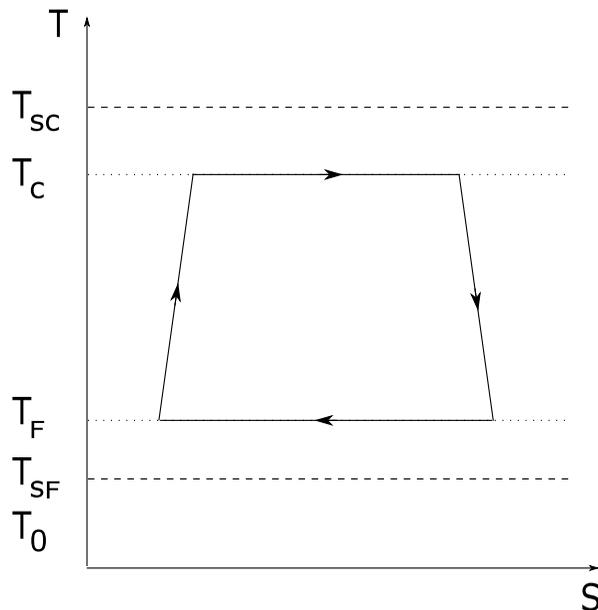
← LA MACHINE DE CARNOT →



● Bilan énergétique  $\dot{q}_C + \dot{q}_F + \dot{W} = 0$

● Bilan entropique  $\frac{\dot{q}_C}{T_C} + \frac{\dot{q}_F}{T_F} + \dot{W} = 0$

● Bilan exergetique  $\dot{q}_C \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) + \dot{q}_F \left(1 - \frac{T_0}{T_F}\right) + \dot{W} - T_0 \dot{S}_i = 0$



# 3 l'outil thermodynamique : concept et conventions

## LA MACHINE DE CARNOT ENVIRONNÉE (ADIABATIQUE)

- Bilan entropique  $\frac{\dot{q}_{SC}}{T_{SC}} + \frac{\dot{q}_{SF}}{T_{SF}} + \dot{S}_t = 0$
- $\dot{S}_t = \dot{S}_i + \dot{q}_{SC} \left( \frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_{SC}} \right) + \dot{q}_{SF} \left( \frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_{SF}} \right)$
- Bilan exergetique  $\dot{q}_{SC} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{SC}} \right) + \dot{q}_{SF} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{SF}} \right) + \dot{W} - T_0 \dot{S}_t = 0$

### EXEMPLE : Cogénération Chaude

- Exergie entrée  
 $\dot{E}x_e = \dot{q}_{SC} \left( 1 - \frac{T_0}{T_C} \right) = -\dot{q}_{SF} \left( 1 - \frac{T_0}{T_F} \right) - \dot{W} + T_0 \dot{S}_i = -\dot{E}x_s + T_0 \dot{S}_i$
- Exergie dépensée  
 $\dot{E}x_d = \dot{q}_{SC} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{SC}} \right) = -\dot{q}_{SF} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{SF}} \right) - \dot{W} + T_0 \dot{S}_t = -\dot{E}x_u + T_0 \dot{S}_t$

# 4 Étude de cas de Cogénération chaude : thermostatique

- Approche énergétique

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_u &= \dot{W} + \dot{q}_U = -\dot{q}_{SC} \\ \dot{E}_d &= \dot{q}_{SC} \end{aligned} \right\} \forall, T_u$$

- efficacité énergétique de cogénération

$$\eta_{ICOGGE} = \frac{\dot{E}_u}{\dot{E}_d} = 1$$

*remarque : en pratique rend compte des pertes d'adiabaticité et des consommations des auxiliaires, ainsi que des rejets thermiques non valorisés*

- Approche exergetique

$$\begin{aligned} \dot{E}x_u &= \dot{W} + \dot{q}_U \left(1 - \frac{T_0}{T_U}\right) \\ \dot{E}x_d &= \dot{q}_{SC} \left(1 - \frac{T_0}{T_{SC}}\right) \end{aligned}$$

avec  $\dot{E}x_d = -\dot{E}x_u + T_0 \dot{S}i$

- efficacité exergetique de cogénération

$$\eta_{exCOGGE} = \frac{-\dot{E}x_u}{\dot{E}x_d} = 1 - \frac{T_0 \dot{S}i}{\dot{E}x_d} = 1 - \frac{\dot{I}}{\dot{E}x_d}$$

*remarque : généralisation en non-adiabatique*  $\eta_{exCOGGE} = 1 - \frac{\dot{q}_P \left(1 - \frac{T_0}{T_{SC}}\right) + \dot{I}}{\dot{E}x_d}$

# 4 Étude de cas de Cogénération chaude : thermodynamique

MACHINE NON ADIABATIQUE

IRRÉVERSIBILITÉ FORFAITAIRE DU CONVERTISSEUR,  $\dot{S}_i$

- Approche énergétique

$$\eta_{ICOGE} = 1 - \frac{\dot{q}_P}{\dot{q}_{SC}}, \text{ rendement d'adiabaticité}$$

- Approche exergetique sur la machine

$$-\dot{E}x_s = \dot{q}_C \left( 1 - \frac{T_0}{T_C} \right) - T_0 \dot{S}_i, \text{ fonction objectif (F.O.)}$$

$T_0, \dot{S}_i$  paramètres ;  $T_C$  variable

$$OPT(-\dot{E}x_s) \Leftrightarrow OPT(\dot{q}_C) \Leftrightarrow OPT(\dot{q}_{SC} - \dot{q}_P)$$

**Loi de transfert linéaire**

$$\dot{q}_C = K_C (T_{SC} - T_C); \dot{q}_U = K_U (T_U - T_F); \dot{q}_P = K_P (T_{SC} - T_0)$$

$T_{SC}, T_U, K_P$  paramètres

↪ OPTIMISATION

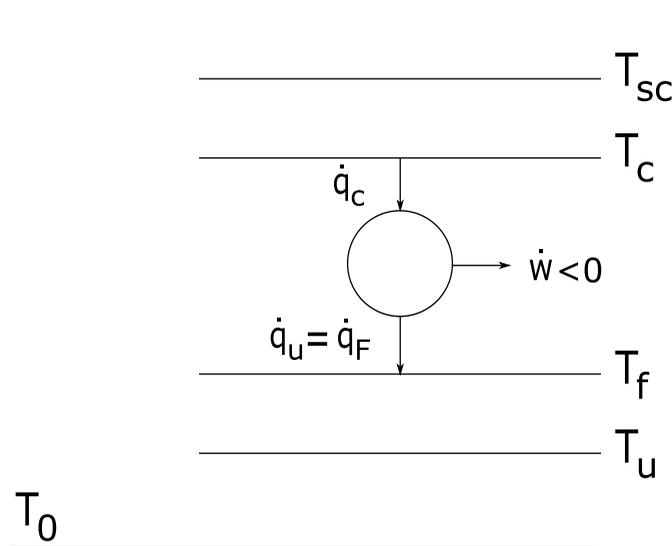
- Optimisation par rapport à  $T_C, T_F$

$$T_{C_{opt}} = \sqrt{T_{SC} T_0}, \forall T_F \succ T_U$$

# 4 Étude de cas de Cogénération chaude : thermodynamique

COGÉNÉRATEUR UTILISANT UN MOTEUR DE CARNOT

MACHINE ADIABATIQUE, ENDORÉVERSIBLE, ENVIRONNÉE



● Deux bilans :

● Énergétique  $\dot{q}_C + \dot{q}_U + \dot{W} = 0$

● Entropique  $\frac{\dot{q}_C}{T_C} + \frac{\dot{q}_U}{T_F} = 0$

● La production énergétique

● La force

$$\dot{W} = -\dot{q}_C \left( 1 - \frac{T_F}{T_C} \right)$$

● La chaleur

$$\dot{q}_U = -\dot{q}_C \left( \frac{T_F}{T_C} \right)$$

● Deux approches sont présentées dans la suite :

● Sans loi de transfert

● Avec transferts finis  $\leftrightarrow$  conductances

● Chaude  $\dot{q}_C = K_C (T_{SC} - T_C)$

● Utile  $\dot{q}_F = \dot{q}_U = K_U (T_U - T_F)$

● Quatre contraintes :

● consommation d'énergie primaire

● production d'électricité

● production de chaleur

● ratio chaleur force

# Approche "classique" $\dot{q}_C$ imposé

## ● sans lois de transfert

- L'exergie utile  $\dot{E}x_U$  :  $\dot{E}x_U = \dot{W} + \left(1 - \frac{T_0}{T_U}\right) \dot{q}_u = -\dot{q}_c \left(1 - \frac{T_0 T_F}{T_U T_C}\right)$

- L'exergie dépensée  $\dot{E}x_D$  :  $\dot{E}x_D = \dot{q}_c \left(1 - \frac{T_0}{T_{SC}}\right)$

- le rendement exergetique de cogénération  $\eta_{ex}$  :  $\eta_{ex} = -\frac{\dot{E}x_U}{\dot{E}x_D} = \frac{1 - \frac{T_0 T_F}{T_U T_C}}{1 - \frac{T_0}{T_{SC}}}$

## ● avec lois de transferts

- une nouvelle expression de la contrainte entropique  $\frac{K_C (T_{SC} - T_C)}{T_C} + \frac{K_U (T_U - T_F)}{T_F} = 0$

→ méthode des Lagrangiens →  $\frac{T_F}{T_U} = \frac{T_C}{\sqrt{T_{SC} T_0}}$

- il existe  $T_C^* = \frac{\sqrt{T_{SC} T_0} + \frac{K_C}{K_U} T_{SC}}{1 + \frac{K_C}{K_U}}$  qui maximise  $\dot{E}x_U = -\frac{K_C K_U}{K_C + K_U} (\sqrt{T_{SC}} - \sqrt{T_0})^2, \forall T_U$

remarque

- si  $K_U + K_C = K_T$  optimum à l'équirépartition  $K_C^* = K_U^* = K_T/2$

- si  $T_F \rightarrow T_U$  ( $K_U \rightarrow \infty$ ) : Machine de CHAMBADAL-NOVIKOV

$$T_C^* = \sqrt{T_{SC} T_0}, \forall K_C \quad \text{A.N.} \quad T_C^* = \sqrt{2000 \times 300} = 775 \text{ K}$$

# Approche à un ratio Chaleur-Force imposé $R = \frac{\dot{q}_U}{\dot{W}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q}_F = R\dot{W} \\ \dot{q}_C + \dot{q}_F + \dot{W} = 0 \\ \frac{\dot{q}_C}{T_C} + \frac{\dot{q}_F}{T_F} = 0 \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{W} = \frac{\dot{q}_F}{R} \\ \dot{q}_F = -\dot{q}_C \left( \frac{R}{1+R} \right) \\ \frac{1}{T_C} - \frac{R}{1+R} \frac{1}{T_F} = 0 \end{array} \right.$$

$$\frac{T_F}{T_C} = \frac{R}{1+R}, \text{ indépendamment des lois de transferts}$$

- sans lois de transfert :  $\dot{E}x_U = -\dot{q}_C \left( 1 - \frac{T_0}{T_U} \frac{R}{1+R} \right)$

- avec lois de transfert :  $\dot{E}x_U = -\frac{K_C K_U}{K_C + K_U} \left( T_{SC} - T_U \frac{1+R}{R} \right) \left( 1 - \frac{T_0}{T_U} \frac{1+R}{R} \right)$

$\dot{E}x_U$  est optimum si :

- $K_C^* = K_U^* = \frac{K_T}{2}$

- $\frac{d\dot{E}x_U}{dX} = 0$  avec  $X = T_U \frac{1+R}{R}$  on obtient  $X^* = T_U \frac{1+R}{R} = \sqrt{T_{SC} T_0}$

- à  $T_U$  donné il existe  $R_{opt}$

- à  $R$  donné il existe  $T_{U_{opt}}$

# Approche $\dot{W}_0$ imposé

$$\begin{cases} \dot{q}_C + \dot{q}_F + \dot{W}_0 = 0 \\ \frac{\dot{q}_C}{T_C} + \frac{\dot{q}_F}{T_F} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \dot{q}_F = -(\dot{q}_C + \dot{W}_0) \\ \frac{\dot{q}_C}{T_C} - \frac{\dot{q}_C + \dot{W}_0}{T_F} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{T_F}{T_C} = \frac{\dot{q}_C + \dot{W}_0}{\dot{q}_C}$$

● sans lois de transfert :

●  $\dot{E}x_U = -\dot{q}_C \left(1 - \frac{T_0}{T_U}\right) + \frac{T_0}{T_U} \dot{W}_0$

l'optimum  $\dot{E}x_U$  correspond à l'optimum de  $\dot{q}_C$

●  $\dot{E}x_U = \dot{W}_0 - \dot{q}_F \left(1 - \frac{T_0}{T_U}\right)$

l'optimum  $\dot{E}x_U$  correspond à l'optimum de  $\dot{q}_F$

● avec lois de transfert : avec  $\Delta = K_T^2 (T_{SC} - T_U)^2 + 8 \dot{W}_0 [K_T (T_{SC} + T_U) + 2 \dot{W}_0]$

● avec les contraintes

$$\frac{K_C (T_{SC} - T_C)}{T_C} + \frac{K_U (T_U - T_F)}{T_F} = 0$$

$$K_C (T_{SC} - T_C) + K_U (T_U - T_F) + \dot{W}_0 = 0$$

$$K_C + K_U = K_T$$

● en posant :

$$\alpha = \frac{(T_{SC} - T_C)}{T_C} = \frac{(T_F - T_U)}{T_F}$$

● on obtient  $\alpha_{opt}$

$$\alpha_{opt} = \frac{K_T (T_{SC} - T_U) - \sqrt{\Delta}}{2 K_T (T_{SC} - T_U) + 2 \dot{W}_0}$$

# Approche "chaudière électrogène" $\dot{q}_{U_0}$ imposé

$$\begin{cases} \dot{q}_C + \dot{q}_{U_0} + \dot{W} = 0 \\ \frac{\dot{q}_C}{T_C} + \frac{\dot{q}_{U_0}}{T_F} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \dot{W} = -(\dot{q}_C + \dot{q}_F) \\ \dot{q}_C = -\frac{T_C}{T_F} \dot{q}_{U_0} \end{cases}$$

● sans lois de transfert :

- $\dot{E}x_U = \dot{W} + \dot{q}_{U_0} \left(1 - \frac{T_0}{T_U}\right)$

l'optimum  $\dot{E}x_U$  correspond à l'optimum de  $\dot{W}$

- $\dot{E}x_U = -(\dot{q}_C + \dot{q}_{U_0}) + \dot{q}_{U_0} \left(1 - \frac{T_0}{T_U}\right) = -\dot{q}_C - \dot{q}_{U_0} \frac{T_0}{T_U}$

l'optimum  $\dot{E}x_U$  correspond l'optimum de  $\dot{q}_C$

● avec lois de transfert :

- avec les contraintes

$$\frac{K_C (T_{SC} - T_C)}{T_C} + \frac{K_U (T_U - T_F)}{T_F} = 0$$

$$\dot{q}_U = K_U (T_U - T_F)$$

$$K_C + K_U = K_T$$

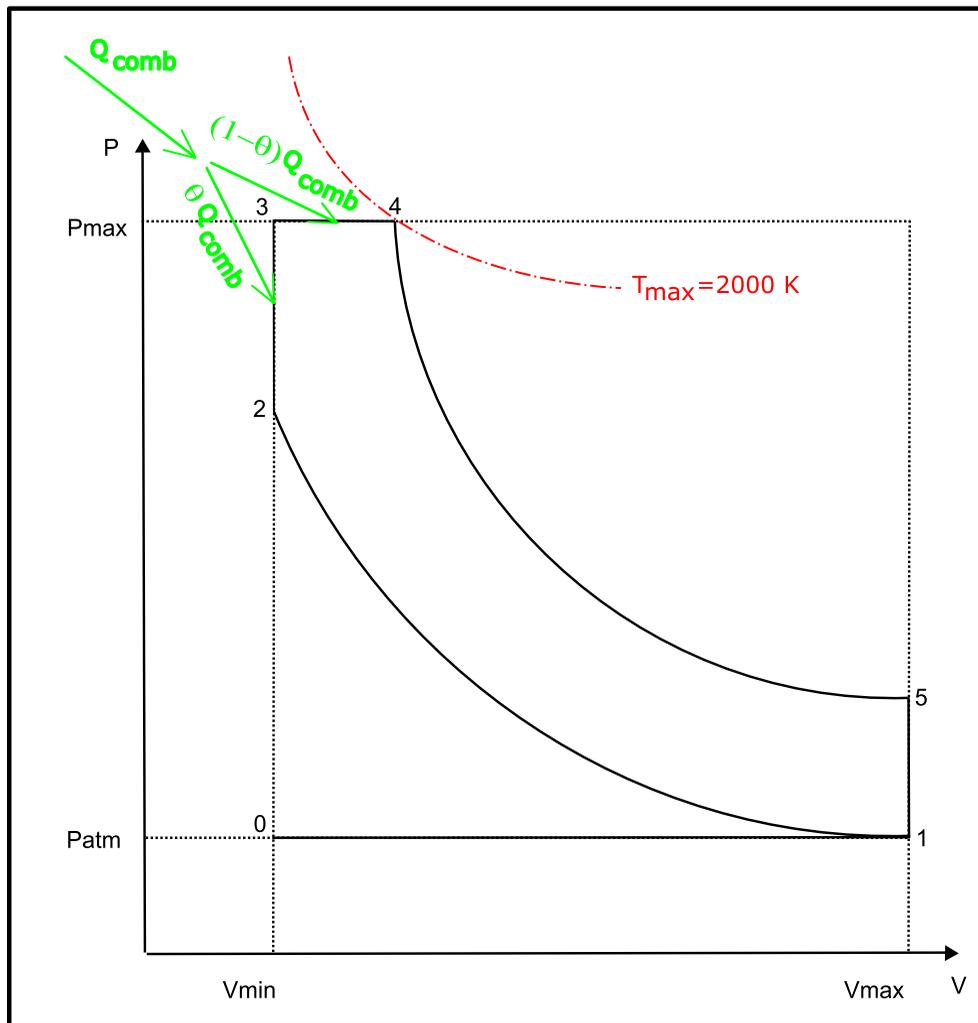
- en posant :

$$\alpha = \frac{(T_{SC} - T_C)}{T_C} = \frac{(T_F - T_U)}{T_F}$$

- on obtient  $\alpha_{opt}$

$$\alpha_{opt} = \frac{\frac{2 \dot{q}_{U_0}}{K_T T_U}}{\frac{2 \dot{q}_{U_0}}{K_T T_U} - 1}$$

# Modèle thermodynamique de cycle mixte MACI



- gaz parfait
- masse cyclée  $m_T = m_g + m_f$
- compression et détente suivent une polytropique
- chaleur apportée lors de la combustion :
  - calculée avec la richesse du mélange  $\phi$

$$Q_{comb} = \frac{\phi m_g}{[A/F]_s} LHV$$

- répartie avec le paramètre  $\theta$  ;
  - combustion isochore  $\theta Q_{comb}$
  - combustion isobare  $(1 - \theta) Q_{comb}$
- La température maximum de cycle est imposée  $T_{max} = T_4$
- Le travail produit :

$$\begin{aligned}
 -W = & m_T C_v (T_3 - T_2) + \\
 & m_T C_p (T_4 - T_3) + \\
 & m_T C_v (T_1 - T_5) + \\
 & Q_{water} + Q_{exhaust}
 \end{aligned}$$

# Énergie $\neq$ Exergie pour MACI

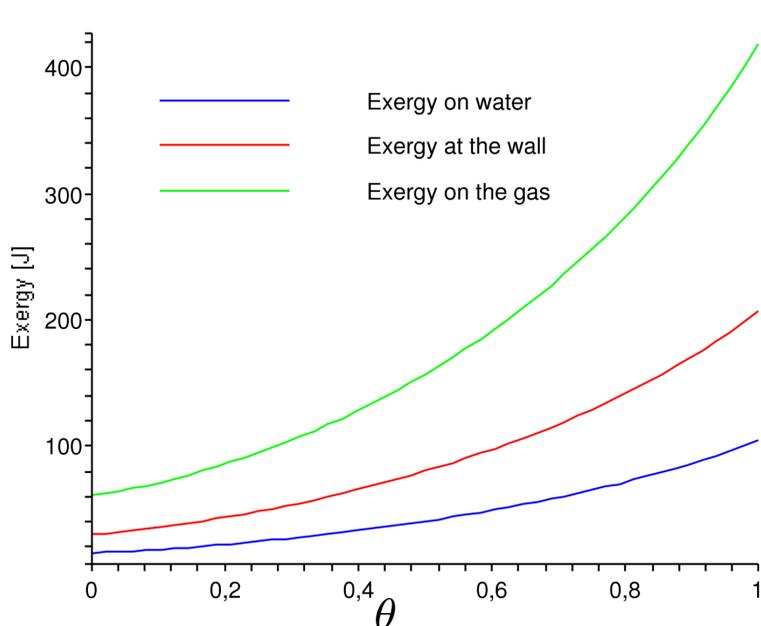
L'exergie contenue dans une chaleur est cette chaleur multipliée par un facteur de Carnot

$$E_x = \left(1 - \frac{T_0}{\overline{T}_{ref}}\right) Q$$

Où la température de référence  $\overline{T}_{ref}$  de la transformation  $i$  à  $f$  est généralement la température entropique

$$\overline{T}_{i-f} = \frac{T_f - T_i}{\ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)}$$

## Importance de la température de référence



● Exergie cédée par le gaz

$$E_x = \sum_{i=1}^5 \left(1 - \frac{T_0}{\overline{T}_{i-i+1}}\right) Q_{i-i+1}$$

● Exergie à la paroi

$$\overline{T}_{ref} = T_w$$

● Exergie disponible sur le liquide de refroidissement

$$\overline{T}_{ref} = T_{water}$$

# rendement : importance des définitions pour MACI

- 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (quantité d'énergie)

$$\eta_I = \frac{|W| + |Q_{water}| + |Q_{exh}|}{Q_{comb}}$$

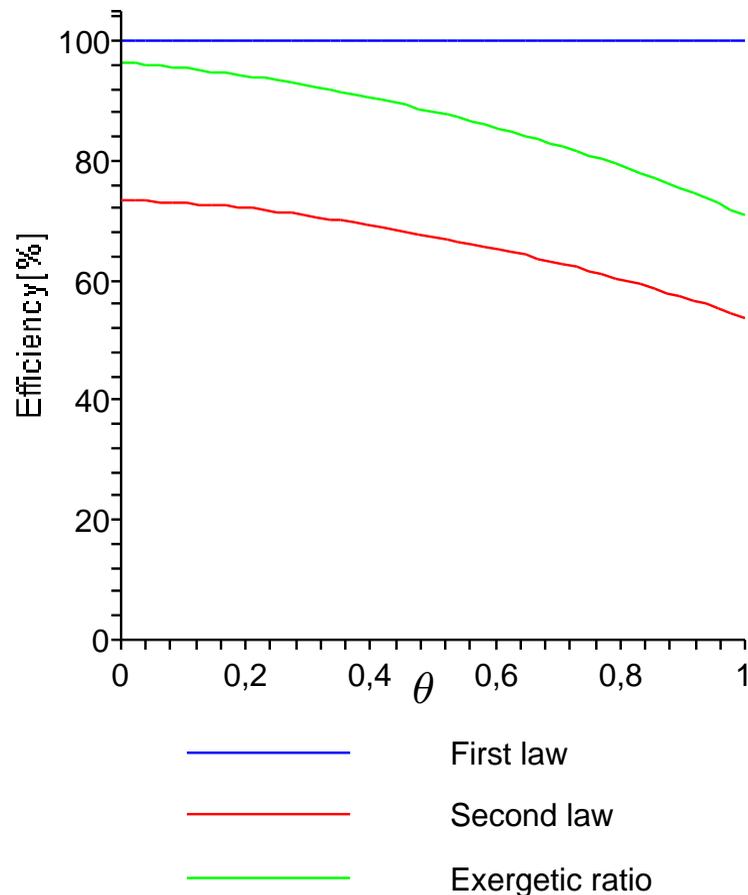
- 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique (qualité de l'énergie)

$$\eta_{II} = \frac{|W| + \left(1 - \frac{T_0}{T_{water}}\right) |Q_{water}| + \left(1 - \frac{T_0}{T_{exh}}\right) |Q_{exh}|}{Q_{comb}}$$

rq : ici  $Q_{comb}$  peut être identifié à  $Q_{chim}$  (exergie pure)

- Rendement Exergetique

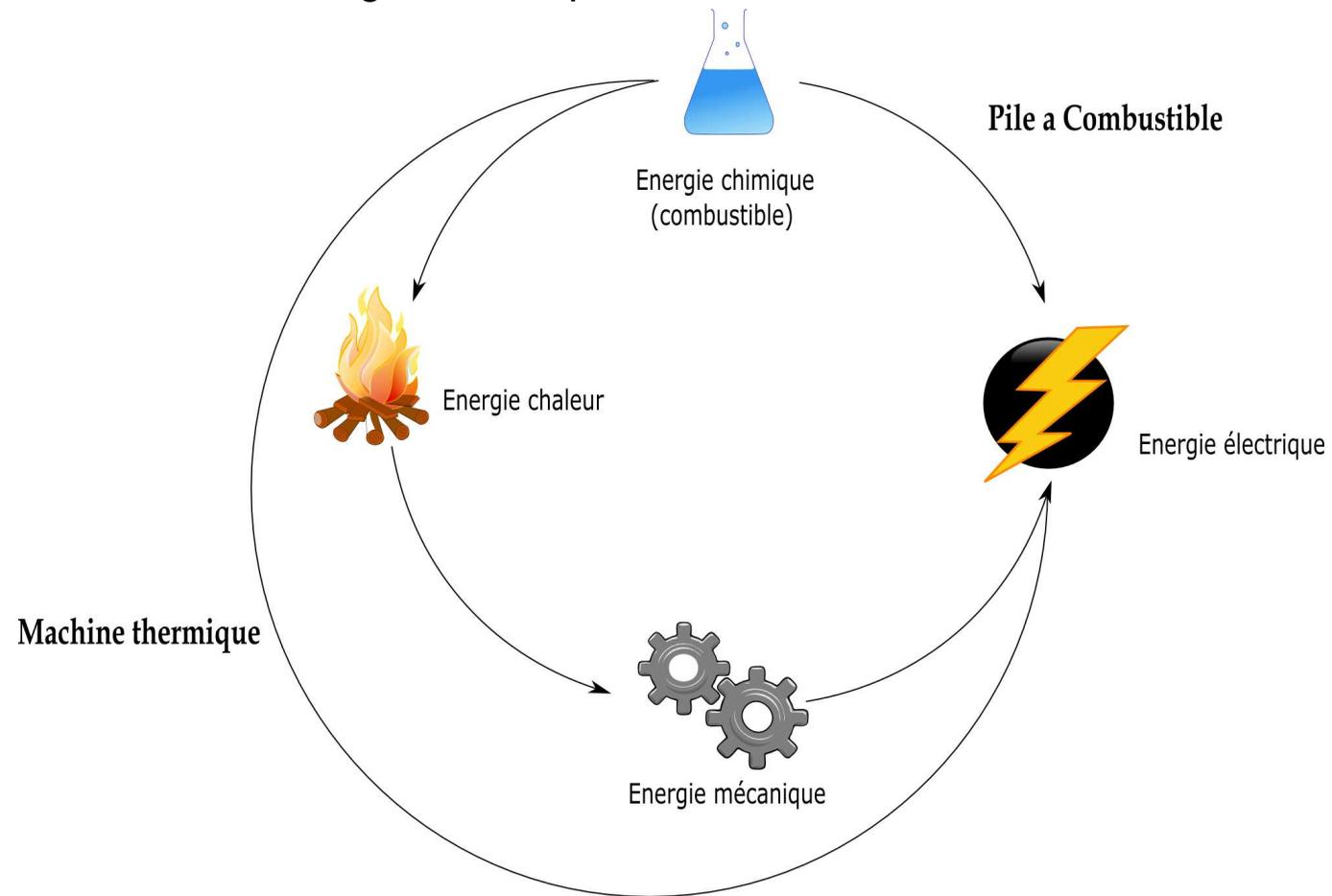
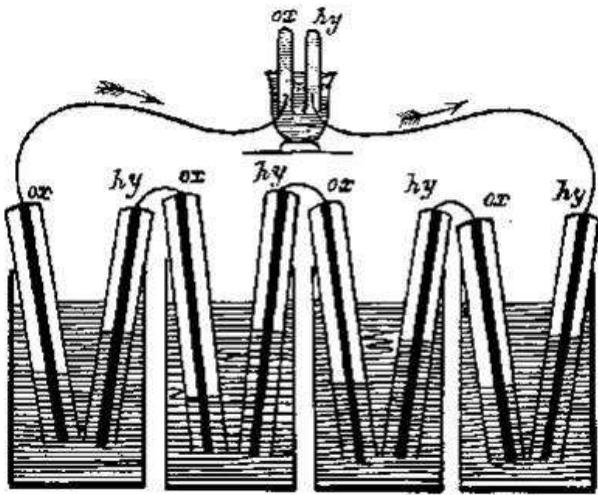
$$\eta_{Ex} = \frac{|W| + \left(1 - \frac{T_0}{T_{water}}\right) |Q_{water}| + \left(1 - \frac{T_0}{T_{exh}}\right) |Q_{exh}|}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{2-3}}\right) \theta Q_{comb} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{3-4}}\right) (1 - \theta) Q_{comb}}$$



Rappel :  $\theta = 0$  cycle de Diesel et  $\theta = 1$  cycle de Otto.

# Comparaison Carnot PACo

- Expérience de W.G. Grove en 1839
- avantage intrinsèque de cette machine



# Comparaison "classique" Carnot PACo

- Une analogie peut être faite entre machine thermique et pile à combustible

	Moteur thermiques	Piles à Combustibles
Énergie disponible sous forme de combustible	$Q_{comb}$	$\Delta h(T)$
Énergie fournie sous forme de Force	$W$	$\Delta g(T, P)$
Énergie valorisable sous forme de Chaleur	$Q_u$	$T \Delta s(T)$
Exergie potentiellement transformable par le système	$Ex_{comb}$	$\Delta g(T_0)$
Exergie Chaleur utile	$Ex_u$	$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) T \Delta s(T)$

- Pour une PACo fonctionnant avec du  $CH_4$  à la pression  $P_0$  et la température  $T$  :

$$\eta_m = \frac{4 \Delta g_{H_2}}{\Delta h_{CH_4,ref} - \Delta h_{CH_4,bru}} = \frac{\Delta g_{H_2}}{\Delta h_{H_2}}$$

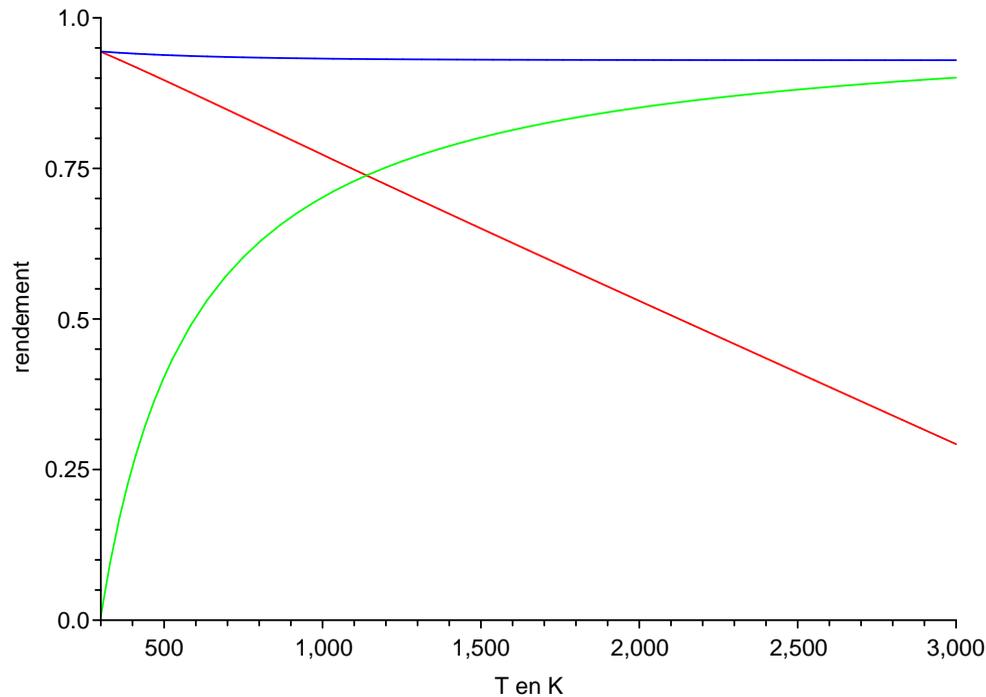
- Le rendement "mécanique"  $\eta_m = \frac{\Delta g(T)}{\Delta h(T)}$

- Le rendement de cogénération 1<sup>er</sup> p.  $\eta_I = \frac{\Delta g(T) + T \Delta s(T)}{\Delta h(T)}$

- Le rendement de cogénération 2<sup>e</sup> p.  $\eta_{II} = \frac{\Delta g(T) + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) T \Delta s(T)}{\Delta h(T)}$

# Comparaison "classique" Carnot PACo

- Approche 1<sup>er</sup> principe en prenant comme référence l'énergie chimique disponible.



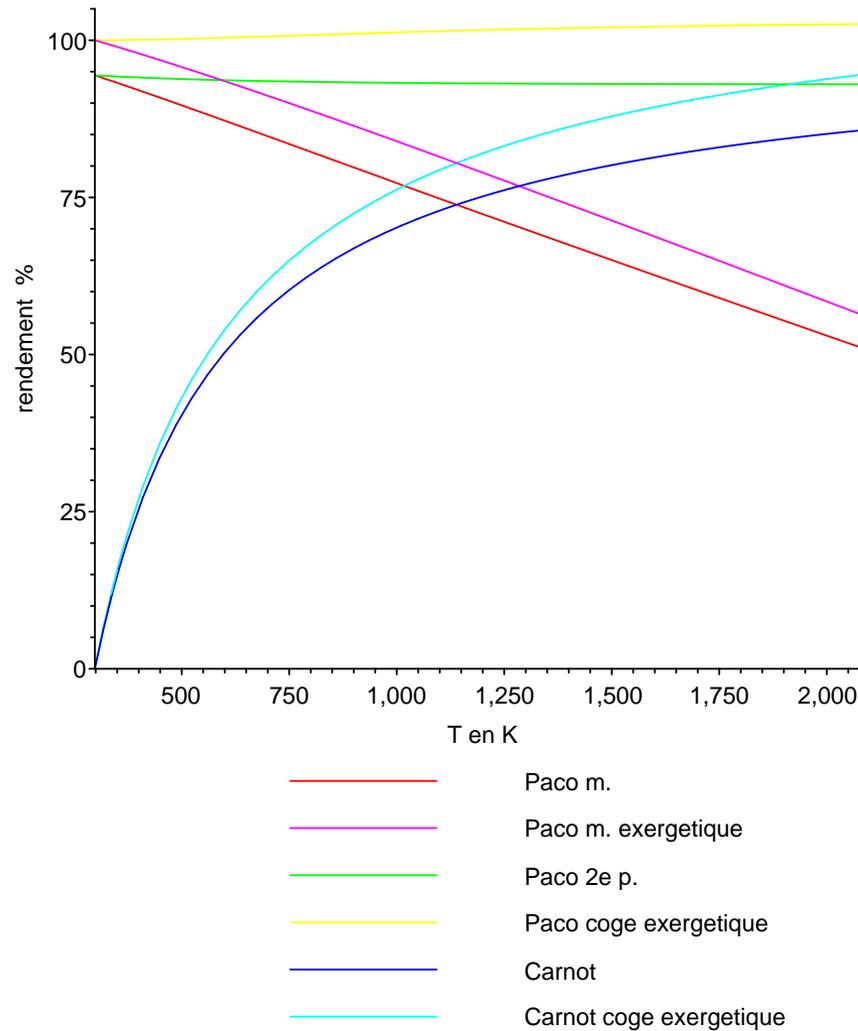
— Paco  
— PACo cogeneration  
— Carnot

- Le rendement exergetique (fonctionnement à  $T$ )

$$\eta_{ex} = \frac{\Delta g(T, P) + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) T \Delta s(T)}{\Delta g(T)}$$

En toute rigueur l'exergie de référence est :  
 $\Delta h(T) - T_0 \Delta s(T)$   
mais  $Err \approx 2\%$

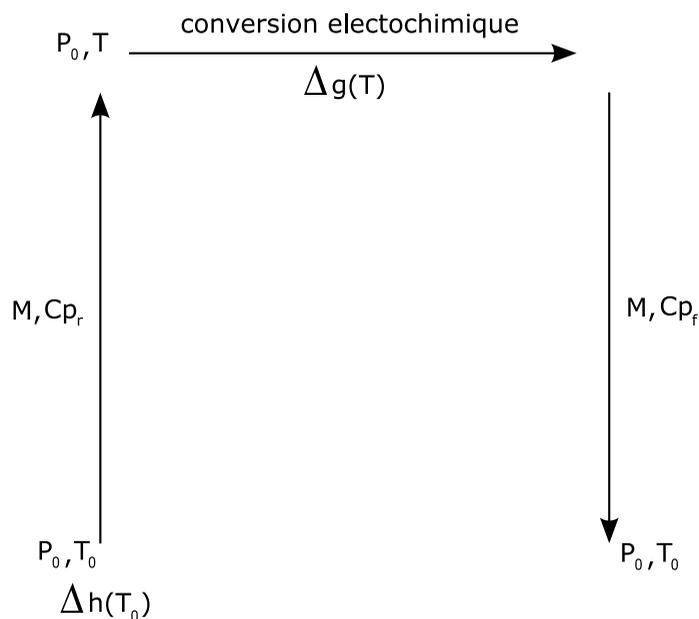
# Comparaison exergetique Carnot PACo



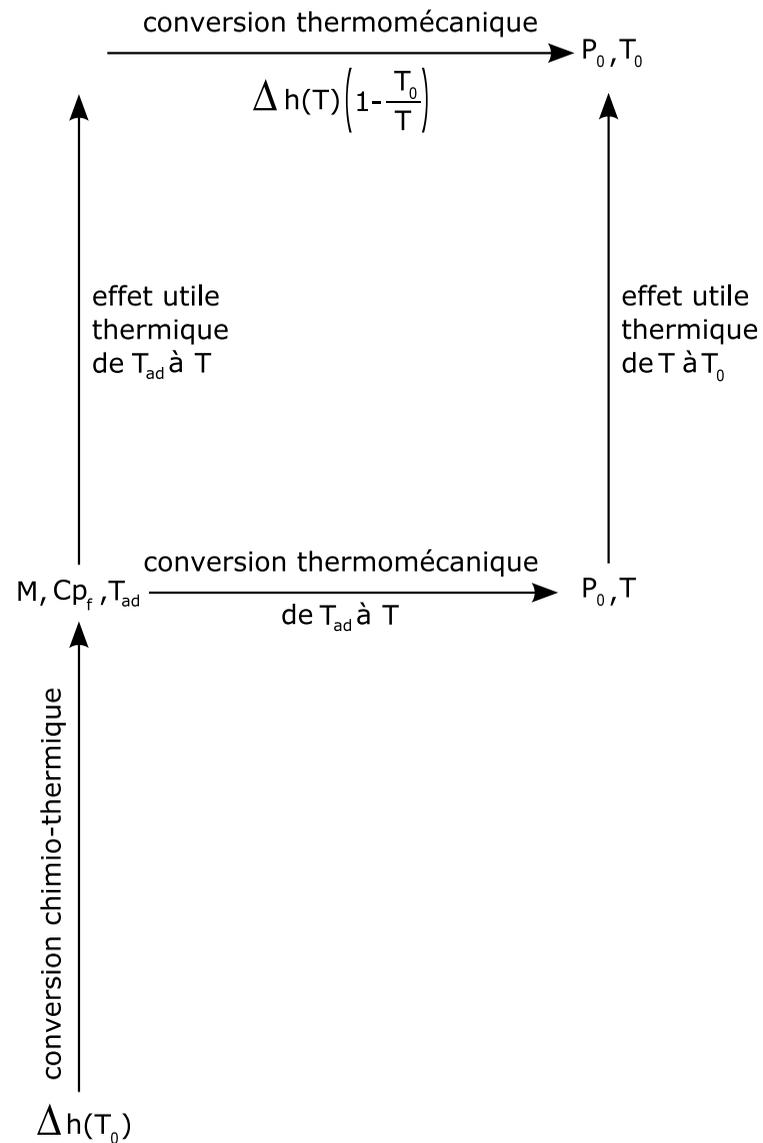
Cependant cette comparaison suppose que les réactifs de la PACo sont à la température  $T$  mais il faut les amener à cette température

# Comparaison Carnot PACo (réactifs à $T_0$ )

## Schéma de principe



**PACo**



**Carnot**

# Comparaison Carnot PACo (réactifs à $T_0$ )

## ● PACo avec chauffage des réactifs

L'exergie chaleur restant pour l'effet utile chaud du système de cogénération :

$$\text{avec } \Delta s(x) = \Delta C_p(x) \frac{dx}{x} \text{ et } d\Delta h(x) = \Delta C_p(x) dx$$

$$\begin{aligned} Ex_{u,eff} &= \int_{T_0}^T \left(1 - \frac{T_0}{x}\right) x d\Delta s(x) dx \\ &= \int_{T_0}^T \left(1 - \frac{T_0}{x}\right) d\Delta h(x) dx \end{aligned}$$

- le rendement au sens du second principe

$$\eta_{II} = \frac{\Delta g(T) + Ex_{u,eff}}{\Delta h(T)}$$

- le rendement exergetique

$$\eta_{ex} = \frac{\Delta g(T) + Ex_{u,eff}}{\Delta g(T_0)}$$

## ● Carnot

- le moteur fonctionne entre  $T_{ad}$  et  $T$ , et rejette de l'énergie thermique de  $T$  à  $T_0$  :

- l'énergie mécanique

$$Cp_f (T_{ad} - T) - T_0 Cp_f \ln \left( \frac{T_{ad}}{T} \right)$$

- l'exergie chaleur

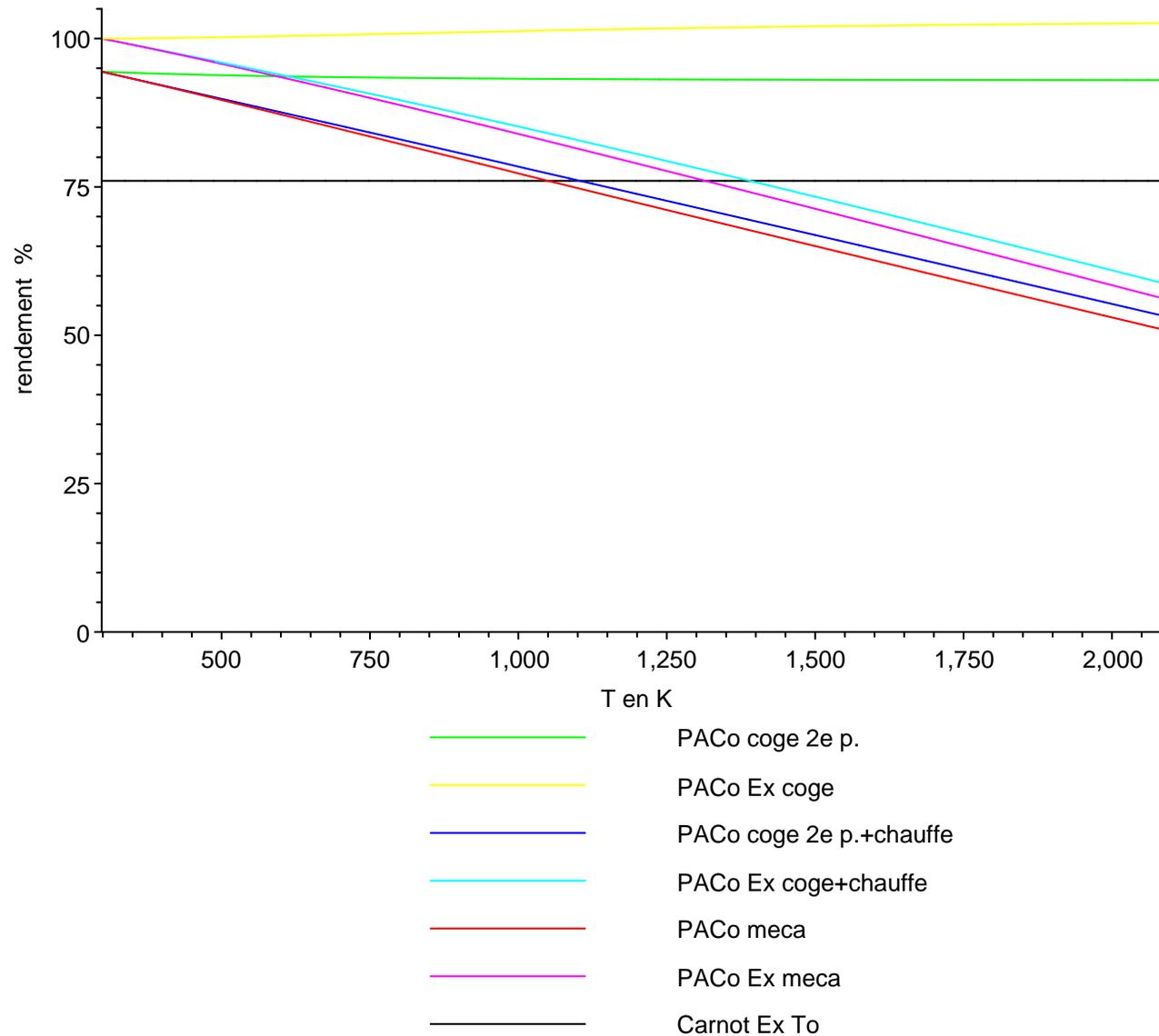
$$Cp_f (T - T_0) - T_0 Cp_f \ln \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

- usage de chaleur disponible de  $T_{ad}$  et  $T$ , et conversion thermomécanique de  $T$  à  $T_0$

Dans les deux cas  $\eta_{ex}$  du système de cogénération est équivalent à :

$$\eta_{ex} = \frac{Cp_f (T_{ad} - T_0) - T_0 Cp_f \ln \left( \frac{T_{ad}}{T_0} \right)}{\Delta g(T_0)} = Cste$$

# Comparaison Carnot PACo (réactifs à $T_0$ )



# Conclusion & Perspectives

- De la pertinence de l'exergie
  - résultats différents de ceux obtenus en moteur ou récepteur  
M.FEIDT, M.COSTEA, C.PETRE, S.PETRESCU, "*Optimisation of the direct Carnot cycle*",  
*Applied Thermal Eng.*, 27, 2007, p.829-839
  - en cogénération chaude intègre la qualité de l'énergie calorifique
- multiplicité des critères et des contraintes
- extensions en cours
  - poly-génération
    - trigénération puissance, chaleur, froid  
M.FEIDT, S.LANG, "*Optimal design of combined power, refrigeration and heating system*",  
*Communication HPC'01, 2<sup>nd</sup> International Heat Powered Cycles Conference*, 5-7 Septembre  
2001, p.233-240
    - systèmes combinés, hybrides
  - intégration de systèmes
  - thermoéconomie
  - A.C.V. : analyse de cycle de vie

# **DE L'UTILITE DE L'EXERGIE : UN EXEMPLE LA COGENERATION CHAUDE**

***Journée SFT 20 Mars 2008, ENSTA, Paris***

***Journée du groupe thématique : ENERGETIQUE  
(Sous groupe thermodynamique)***

**Michel Feidt - Damien Descieux**



**Damien Descieux**

2 avenue de la Forêt de Haye  
BP 160  
54504 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Email: [Damien.Descieux@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:Damien.Descieux@ensem.inpl-nancy.fr)

Tel: +33 (0)3 83 59 55 92

Fax: +33 (0)3 83 59 55 51



**Michel Feidt**

2 avenue de la Forêt de Haye  
BP 160  
54504 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Email: [Michel.Feidt@ensem.inpl-nancy.fr](mailto:Michel.Feidt@ensem.inpl-nancy.fr)

Tel: +33 (0)3 83 59 57 34

Fax: +33 (0)3 83 59 55 51

**Nancy-Université**  
Université  
Henri Poincaré