

# Echangeurs de chaleur : aspects réseaux et U.R.E.

MECA0046-1

Georges Heyen  
Laboratoire d'Analyse et Synthèse  
des Systèmes Chimiques  
Université de Liège

## Cours 2

### Analyse exergetique du transfert de chaleur

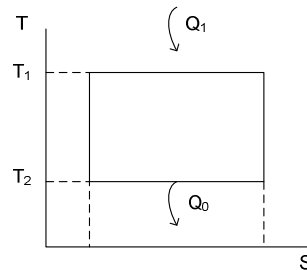
## Echange calorifique

- Travail :

$$W = Q_1 (1 - T_2 / T_1)$$

- Chaleur rejetée à la source froide :

$$Q_0 = Q_1 (T_2 / T_1)$$



- Echange thermoénergétique réversible

≠

Echange calorifique irréversible

## Echange calorifique par mélange

- Irréversible

↳ 1 mole de gaz à 873K ( $T_1=600^\circ\text{C}$ )

+ 1 mole de gaz à 473K ( $T_2=200^\circ\text{C}$ )

- Hypothèse:

↳ Gaz parfait

↳  $C_p=c^{te}=29.1$  kJ/kg (mélange isobare)

- Bilan:

$$C_p (T_1 - T_0) + C_p (T_2 - T_0) = 2 C_p (T_n - T_0)$$

$$T_n = (T_1 + T_2)/2 = 673 \text{ K ou } 400^\circ\text{C}$$

$$V_n = V_1 + V_2 = 2 R T_n / P_0$$

## Echange calorifique par mélange

### ■ Exergies

$$e_1 = (H_1 - H_0) - T_0 (S_1 - S_0) = C_p (T_1 - T_0) - T_0 C_p \ln \frac{T_1}{T_0}$$

À 473 K  $e_1 = 1454 \text{ kJ/kmol}$

À 873 K  $e_2 = 8225 \text{ kJ/kmol}$

Mélange à 673K  $e_3 = 4472 \text{ kJ/kmol}$

$$\begin{aligned} \text{Pertes (irréversibilité)} &= (1454 + 8225) - 2 * 4472 \\ &= 735 \text{ kJ} \end{aligned}$$

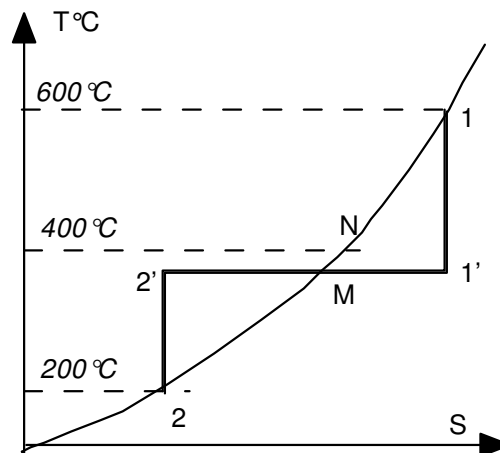
Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

6

## Echange calorifique – mélange réversible

- Détente isentropique 1-1'
- Compression isotherme 1'-M
- Compression isentropique 2-2'
- Détente isotherme 2'-M



Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

7

## Echange calorifique – mélange réversible

### ■ Opérations réversibles

↪ Travail net  $W$

$$H_{\text{mélange}} < H_1 + H_2$$

↪  $T_M < (T_1 + T_2)/2$  (système ouvert)

### ■ Résolution itérative

↪ on suppose  $W=1750$  kW ←

$$H_M = H_1 + H_2 - W = 21530 \text{ kJ}$$

$$H_M = 2C_p (T_M - T_0) \rightarrow T_M = 643 \text{ K}$$

$$\text{Si } P_M = P_1 = P_2 = 0.981 \text{ bar}$$

$$V_M = RT_M / P_M = 54.5 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

## Echange calorifique – mélange réversible

$$W_{11'} = C_p (T_1 - T_{1'}) = C_p (T_1 - T_M) = 6693 \text{ kJ}$$

$$P_{1'} = P_1 \left( \frac{T_{1'}}{T_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 0.899 \text{ bar}$$

$$W_{22'} = -4947 \text{ kJ}$$

$$W_{1'M} = P_M V_M \ln \frac{P_{1'}}{P_M} = -468 \text{ kJ}$$

$$P_{2'} = P_2 \left( \frac{T_{2'}}{T_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1.071 \text{ bar}$$

$$W_{2'M} = P_M V_M \ln \frac{P_{2'}}{P_M} = 468 \text{ kJ}$$

$$\underline{W} = W_{11'} + W_{1'M} + W_{22'} + W_{2'M} = \underline{1746 \text{ kJ}} \leftarrow$$

## Echange calorifique – mélange réversible

### Exergie

$$e_M = C_p (T_M - T_0) - T_0 \left( C_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_M}{P_0} \right)$$

$$= 3961 \text{ kJ / kmol}$$

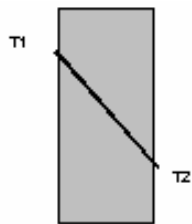
$$\Delta e = W$$

## Echanges conducto-convectifs

- Deux parois planes et parallèles

$$T_1 = T + \Delta T \quad \text{et} \quad T_2 = T - \Delta T$$

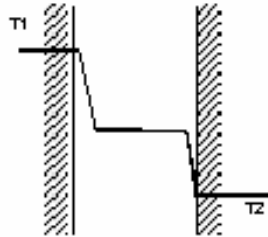
- Conduction



$$q''_c = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda}{e} (2\Delta T)$$

## Echanges conducto-convectifs

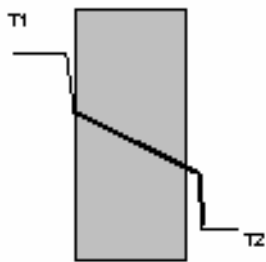
### ■ Convection



$$q''_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} (T_1 - T_2) = \frac{\alpha}{2} (2\Delta T)$$

## Echanges conducto-convectifs

### ■ Convection + conduction

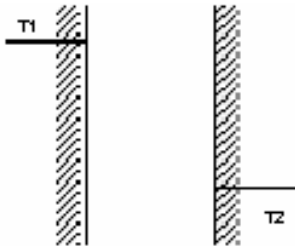


$$q'' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (T_1 - T_2) = k(2\Delta T)$$

↪ Echange proportionnel à  $\Delta T$

↪ Echange indépendant de  $T$

## Echanges radiatifs



- 2 plans parallèles  $\cong$  corps noirs

$$q''_r = \sigma [(T + \Delta T)^4 - (T - \Delta T)^4]$$

$$q''_r = \sigma [(T + \Delta T)^2 - (T - \Delta T)^2] [(T + \Delta T)^2 + (T - \Delta T)^2]$$

$$= 4 \sigma T \Delta T [2T^2 + 2 \Delta T^2]$$

$$\approx 4 \sigma T^3 (2 \Delta T)$$

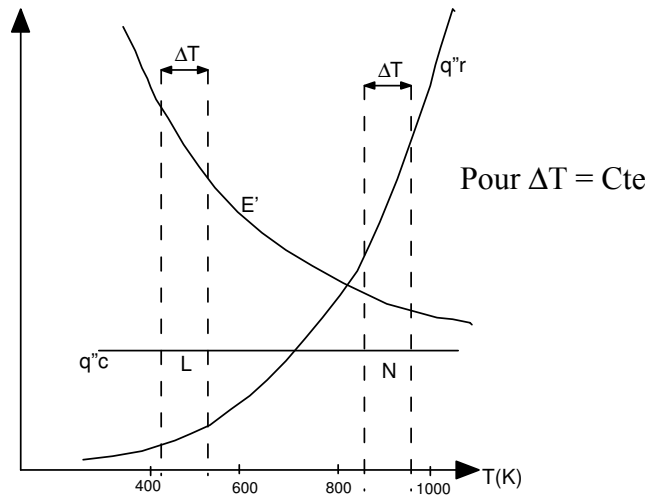
- ↪ Echange proportionnel à  $\Delta T$  pour  $T$  fixé
- ↪ Echange proportionnel à  $T^3$  pour  $\Delta T$  fixé  
→ croît rapidement avec  $T$

## Echanges conducto-convectifs et radiatifs

- Si on assimile les deux parois à deux sources à  $T_1$  et  $T_2$ , on peut y attacher un cycle de Carnot.
- Le travail de ce cycle est l'exergie relative de  $Q$  transféré de  $T_1$  à  $T_2$  et rapportée à  $T_2$ .
- $$E' = Q \left( 1 - \frac{T - \Delta T}{T + \Delta T} \right) = Q \frac{2\Delta T}{T + \Delta T} \approx Q \frac{2\Delta T}{T}$$

- ↪  $E'$  quasi proportionnel à  $\Delta T$  pour  $T$  fixé
- ↪  $E'$  inversement proportionnel à  $T$  pour  $\Delta T$  fixé

# Echange conducto-convectif et échange radiatif



# ECHANGEURS DE CHALEUR

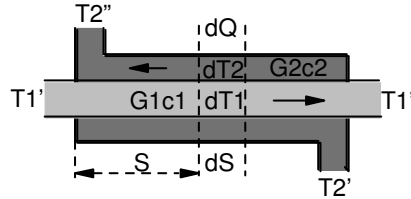
## Echangeurs idéaux

- Élément dS

- $dT_1 = \frac{dQ}{G_1 c_1}$

- $dT_2 = \frac{dQ}{G_2 c_2}$

- $d(T_1 - T_2) = \left( \frac{1}{G_1 c_1} - \frac{1}{G_2 c_2} \right) dQ$

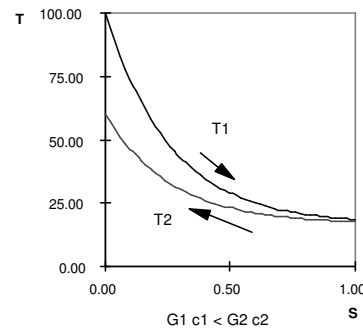
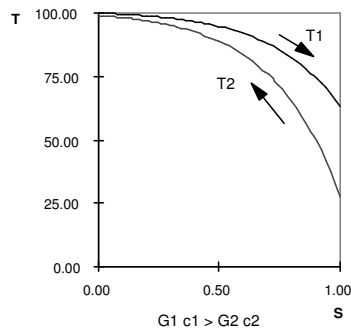


Si  $G_1 c_1 = G_2 c_2$ ,  $d(T_1 - T_2) = 0 \rightarrow T_1 - T_2 = \text{constante}$   
 En réduisant l'écart, on limite les irréversibilités  
 et  $\Delta e \rightarrow 0$ , MAIS  $S \rightarrow \infty$

## Echangeurs idéaux

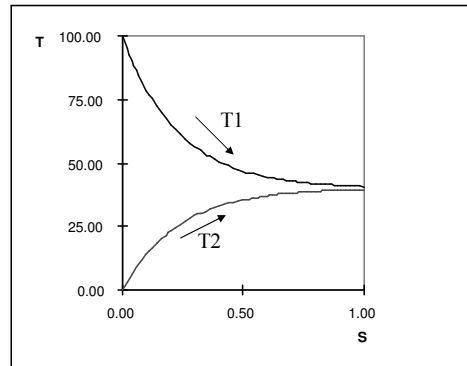
- Si  $G_1 c_1 \neq G_2 c_2$ , écart  $T_1 - T_2$  varie  
 ↳ Irréversibilité inévitable

- Exemple: échange à contre-courant



## Echangeurs idéaux

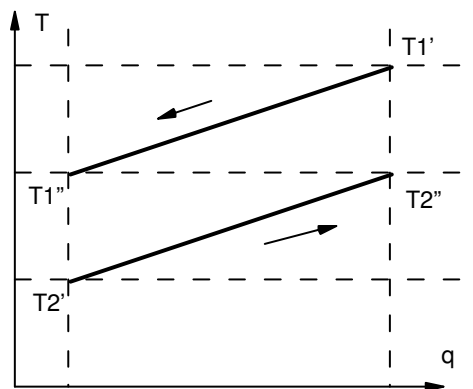
### ■ Exemple : échange à co-courant



## Echangeurs réels

### ■ Exemple :

- fluides de même  $C_p = 29.1 \text{ kJ/kmol/K}$
- $\Delta T = 100^\circ\text{C}$



## Echangeurs réels

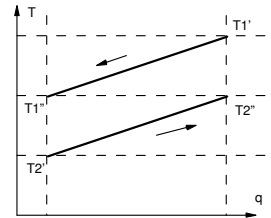
- Fluide chaud :  $T_1' = 400^\circ\text{C}$ ,  $T_1'' = 300^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 273.15$

$$\Delta e_1 = C_p (T_1' - T_1'') - T_0 C_p \ln \frac{T_1'}{T_1''} = 1632 \text{ kJ / kmol}$$

- Fluide froid :  $T_2' = 200^\circ\text{C}$ ,  $T_2'' = 300^\circ\text{C}$

$$\Delta e_2 = C_p (T_2'' - T_2') - T_0 C_p \ln \frac{T_2''}{T_2'} = 1386 \text{ kJ / kmol}$$

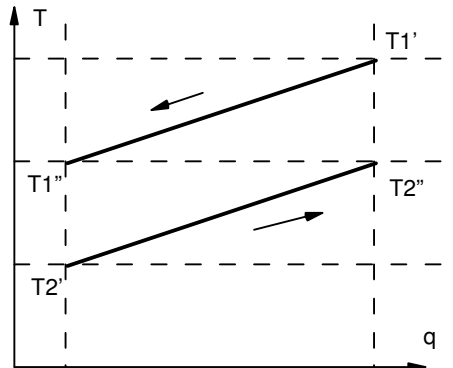
- Perte d'exergie (irréversibilité):  $\Delta e = 246 \text{ kJ}$   
soit 15.1% de  $\Delta e_1$



## Echangeurs réels

- Variation: on pose  
 $T_1' = T_1'' + 100$   
 $T_2'' = T_1''$   
 $T_2' = T_2'' - 100$

$T_1'' = T_2''$	$\frac{\Delta e}{\Delta e_1}$
100°C	0.579
200	0.262
300	0.151
400	0.098
500	0.069

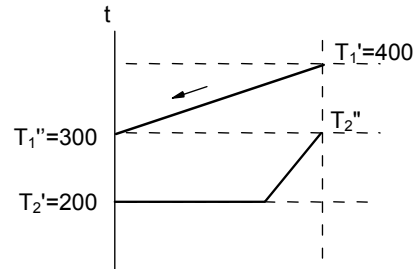


## Echangeurs réels

- Vaporisation  $\cong$  irréversibilités accrues

- Exemple :

- même fluide chaud
- fluide froid=eau saturée
- vaporisation
- surchauffée jusque  $T_2''$



- $\Delta H$  (fluide chaud) =  $C_p(T_1' - T_1'')$

- $\Delta H$  (fluide froid) =  $h - h'$

- $h'$ : eau saturée liquide, 200°C, 16 bar
- $h$ : vapeur surchauffée, 300°C, 16 bar

- Débit d'eau (pour 1 kmol de gaz) = 
$$\frac{C_p(T_1' - T_1'')}{h - h'}$$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

24

## Echangeurs réels

- Fluide froid

$$\Delta e_2 = [h - h' - T_0(S - S')] \frac{C_p(T_1' - T_1'')}{h - h'} = 1260 \text{ kJ}$$

- Fluide chaud (idem précédemment)

$$\Delta e_1 = C_p(T_1' - T_1'') - T_0 C_p \ln \frac{T_1'}{T_1''} = 1632 \text{ kJ / kmol}$$

- Perte

$\Delta e = 372 \text{ kJ}$  soit 23% de  $\Delta e_1$  contre 15% pour l'échange gaz-gaz

→ limiter les irréversibilités avec une vaporisation étagée

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

25

## Irréversibilités thermiques et mécaniques

### ■ Exemple

- ◆ Cas de base : échangeurs en parallèle
- ◆ Variante : échangeurs en série



## Exemple d'applications

### ■ Chauffage domestique

- ◆ Radiateur domestique infra rouge
  - rayonnement
- ◆ Poêle
  - rayonnement + convection
- ◆ Chauffage central, circulation d'eau
  - Convection, <20% rayonnement

### ■ Séchage

- ◆ Convection : circulation forcée de l'air réchauffé par des tubes à ailettes
- ◆ Rayonnement (H<sub>2</sub>O!)

### ■ Générateur de vapeur

## Générateur de vapeur - évolution

- Surchauffe  $T \uparrow$
- P croissante
- Soutirage  $\rightarrow$  réchauffe eau
- Resurchauffe
- Puissance  $\uparrow$

### ↳ Conséquences

- $P \uparrow$  : vaporisation moins importante  
économiseur plus important  
resurchauffe sinon vapeur trop humide
- Soutirages : économiseur  $\downarrow$   
 $\rightarrow$  réchauffeur d'air sauf si  $P \uparrow$

## Générateur de vapeur - évolution

### ↳ Unités récentes

- Vaporiseur : S modérée,  $T_{\text{gaz}} \cong 1000-1300^\circ\text{C}$
- Surchauffeur : S important,  $T_{\text{gaz}} \cong 1000^\circ\text{C}$
- Resurchauffeur : S important,  $T_{\text{gaz}} \cong 1000^\circ\text{C}$
- Économiseur : S modérée
- Resurchauffeur d'air : S important

### ↳ Principes de conception

- $\Delta T$  petit : irréversibilités  $\downarrow$
- Échange radiatif à haute T
  - ✓ Air préchauffé
  - ✓ Faible excès
- Échange convectif : S  $\uparrow$ , ailettes



# RENDEMENT EXERGETIQUE DES PROCESSUS THERMIQUES



## Notion de rendement exergetique

Combustion → transfert de chaleur

Illustrations : hypothèses

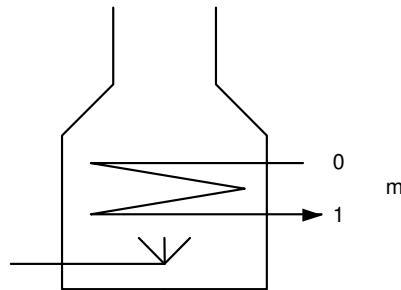
combustible = C

PCI = 395.5 kJ/atgr

e=411.2 kJ/atgr

$T_0=0^\circ\text{C}$

## Chaudière à eau chaude



Production d'eau chaude

✓ de 0°C à 100°C

✓ on suppose  $S \rightarrow \infty$

✓  $T_{\text{rejet}} = 0^\circ\text{C}$

$Q = 395.5 \text{ kJ}$

$m = Q / (h_1 - h_0)$

$$e_{\text{eau}} = m \left[ (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) \right]$$

$$= \frac{Q}{h_1 - h_0} \left[ (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) \right] = 58,5 \text{ kJ}$$

$$\eta_{\text{ex}} = 14.2\%$$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

32

## Générateur de vapeur

Production de vapeur

✓ 100 bar à 500°C

✓ mêmes équations

$$e_{\text{générateur}} = m \left[ (h_a - h'_0) - T_0 (s_a - s'_0) \right]$$

$$= 183,5 \text{ kJ}$$

$$\eta_{\text{ex}} = 44.6\%$$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

33

## Four métallurgique

Production de lingots

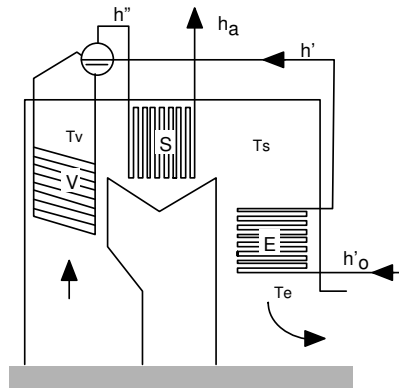
- ✓ de 0°C à 1000°C ( $T_a$ )
- ✓ acier :  $C_p=0.477$  kJ/kg/K

$$e_{\text{acier}} = \frac{Q}{C_p (T_a - T_0)} \left[ C_p (T_a - T_0) - T_0 C_p \ln \frac{T_a}{T_0} \right]$$
$$= 229,1 \text{ kJ}$$

$$\eta_{\text{ex}} = 55.7\%$$

## BILAN EXERGETIQUE DU GENERATEUR DE VAPEUR

## Généralités



- ✓ Combustible assimilé à du carbone pur  
base: 1 atkg de C  
PCI=393500 kJ  
 $e_1 = 410030$  kJ
- ✓ Échange calorifique décomposé en 3 parties (économiseur, vaporiseur et surchauffeur)
- ✓ Conception classique = vaporiseur en tête

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

36

## Irréversibilité de la combustion

### ■ Combustion adiabatique

excès d'air : 50%

$T_0 = 15^\circ\text{C}$

Température adiabatique :  $1558^\circ\text{C}$

$H_{\text{fumée}} = 397066$  kJ/atkg

→  $e_2 = 263320$  kJ

### ↪ Irréversibilité de la combustion

$e_1 - e_2 = 410030 - 263320 = 146710$  kJ

soit 35.8% de  $e_1$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

37

## Irréversibilité de la transmission

- $T_{\text{cheminée}} = 120^\circ\text{C}$
- Composition des gaz à la cheminée pour 1 atome-kilogramme de carbone brûlé:
  - ↳ 1 kmol de  $\text{CO}_2$
  - ↳ 0,5 kmol de  $\text{O}_2$
  - ↳ 5,64 kmol de  $\text{N}_2$
- $H_{120} = 26179 \text{ kJ} = (H_{120} - H_o)$
- $S_{120} - S_o = 79,348 \text{ kJ/K}$
- $e_5 = (H_{120} - H_o) - T_o (S_{120} - S_o)$   
 $= 26179 - 288,15 \times 79,348 = 3401 \text{ kJ}$   
 soit 0,8% de  $e_1$

## Irréversibilité de la transmission

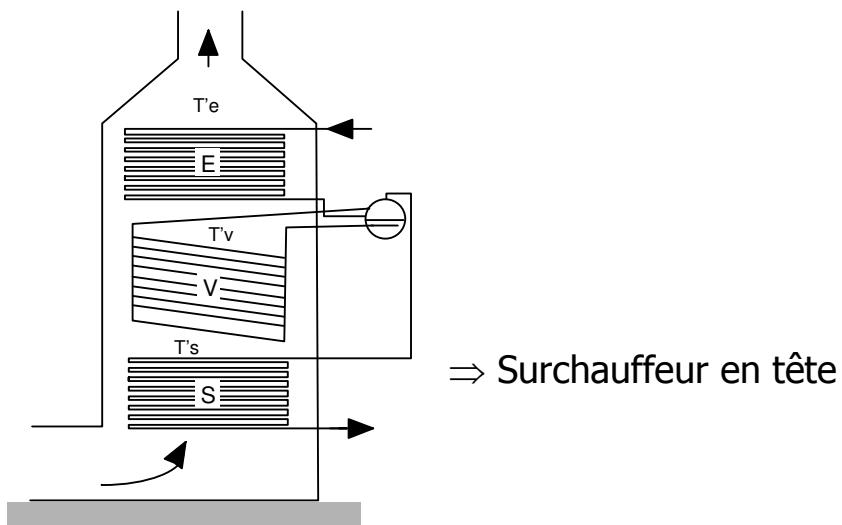
- Débit vapeur (140bar,  $540^\circ\text{C}$  – état A)  
 $= (P_c - H_{120}) / (h_a - h'_o)$   
 $= (397066 - 26179) / (3418,5 - 0) = 108,5 \text{ kg}$

	$H_{\text{fumée}}$ = 397 066 kJ	$e_2 = 263 320 \text{ kJ}$
$Q_v = 115 728 \text{ kJ}$ $e_v = (h'' - h') - T_o (s'' - s')$	$H_v = H_{\text{fumée}} - Q_v$ = 281 338 kJ	$e_3 = H_v - H_o - T_o (S_v - S_o)$ = 195 028 kJ
$Q_s = 86 310 \text{ kJ}$ $e_s = (h_a - h'') - T_o (s_a - s'')$	$H_s = H_v - Q_s$ = 195 028 kJ	$e_4 = H_s - H_o - T_o (S_s - S_o)$ = 101 905 kJ
$Q_e = 168 849 \text{ kJ}$ $e_e = (h' - h'_o) - T_o (s' - s'_o)$	$H_e = H_s - Q_e$ = 26 179 kJ	$e_5 = 3 401 \text{ kJ}$

## Résumé

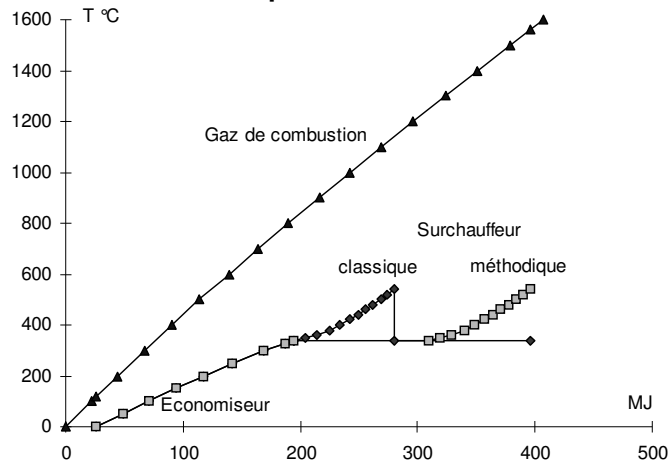
$\Delta e$	Cédé par gaz	Reçu par eau	perte
Vapo	95085	61049	8.3% de e1
Surch	66372	50103	4% de e1
Éco	98504	55639	10.5% de e1
		<b>166791</b>	40.7% de e1
Combustion			35.8% de e1
Cheminée			0.8% de e1

## Cas de la circulation méthodique



## Cas de la circulation méthodique

### ■ Evolution des températures dans un générateur de vapeur



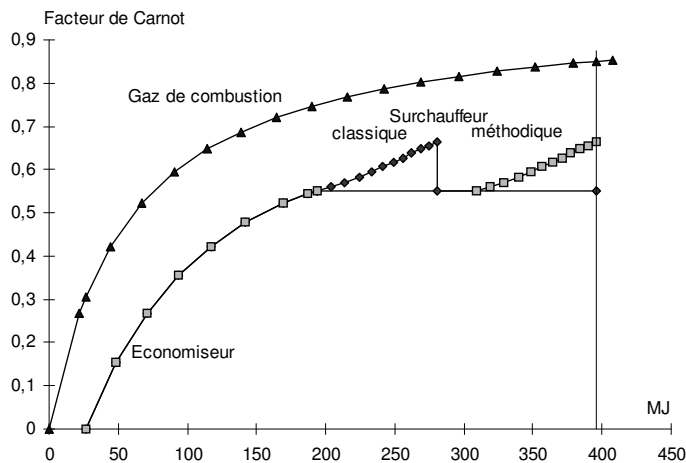
Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

42

## Cas de la circulation méthodique

### ■ Irréversibilités dues au transfert de chaleur dans un générateur de vapeur



Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

43

## Conclusions

### ■ Bilans exergetiques des générateurs de vapeur

		Circulation classique	Circulation méthodique
ACTIF	Exergie du combustible	100%	100%
PASSIF	Irréversibilité de la combustion	35,8%	35,8%
	Irréversibilité de la transmission au vaporiseur	8,3%	7,1%
	Irréversibilité de la transmission au surchauffeur	4,0%	5,2%
	Irréversibilité de la transmission au économiseur	10,5%	10,5%
	Total irréversibilité de transmission	22,7%	22,7%
	Exergie de la vapeur produite	40,7%	40,7%
	Perte à la cheminée	0,8%	0,8%

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

44

## Conclusions

### ■ Irréversibilité des échanges dans les générateurs de vapeur

	A chaleur échangée	Circulation classique		Circulation méthodique	
		B Perte d'exergie	B/A Perte relative	C Perte d'exergie	C/A Perte relative
Echange au vaporisateur	31,2%	36,5%	1,171	31,1%	0,995
Echangeur au surchauffeur	23,3%	17,4%	0,749	22,9%	0,985
Echange à l'économiseur	45,5%	46,0%	1,011	46,0%	1,011

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

45



# UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE DES COMBUSTIBLES



## Introduction

- Combustibles utilisés pour produire
  - ◆ De la chaleur
  - ◆ De l'énergie mécanique
  - ◆ Une combinaison des deux
- ↳ Comparaison de plusieurs schémas
  - ✓ Rendement calorifique
  - ✓ Rendement exergetique
- Combustible = C
  - ✓ Base 1 atkg de C ( $Q=PCI=393500$  kJ ;  $e_1= 410030$  kJ)
  - ✓ excès d'air : 50% →  $T_{adiabatique} : 1558^{\circ}C$
  - ✓  $T_0=15^{\circ}C$
  - ↳  $e_2= 263320$  kJ
  - ↳  $\Delta e_{combustion} = 146\ 710$  kJ (35,9 % de  $e_1$ )

## Chauffage classique

➤ Chauffage eau 100°C, 5 bar, retour 15°C

$h_0=62.8$  kJ/kg ;  $s_0=0.224$  kJ/kg/K;  $h_e=419$  kJ/kg;  $s_e=1.307$  kJ/kg/K

➤  $C + 1,5 O_2 + 5,64 N_2 \rightarrow CO_2 + 0,5 O_2 + 5,64 N_2 + \underline{P}$

➤ Cheminée 200°C :  $H'=44200$  kJ  
 $e'=9404$  kJ (2.3% de  $e_1$ )

➤ Chaleur utile :  $H_2-H'=352\ 866$  kJ

➤ Eau réchauffée :  $m=Q/(h_e-h_0)=990,6$  kg

➤ Exergie eau chaude :  $e_e=m((h_e-h_0)-T_0(s_e-s_0))=43685$  kJ  
(10.6%  $e_1$ )

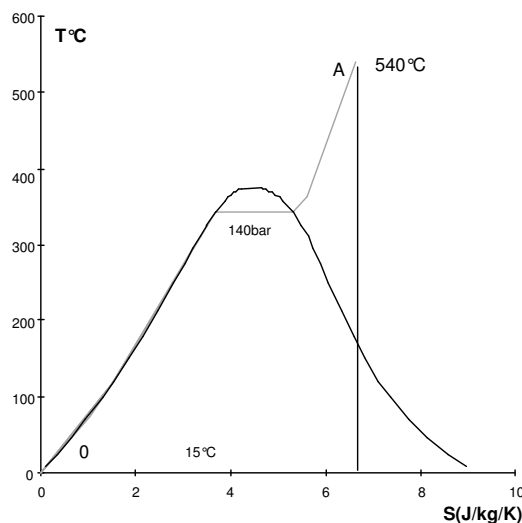
➤ Irréversibilité échange :  $e_2-e'-e_e=210231$  kJ (51,1%  $e_1$ )

➤ Rendement exergetique :  $\eta_{ex}=e_e/e_1=10.6\%$

➤ Rendement thermique :  $\eta_{th}=Q/P=89.6\%$

## Centrale thermique

■ Cycle d'une centrale thermique idéale



## Centrale thermique (idéale)

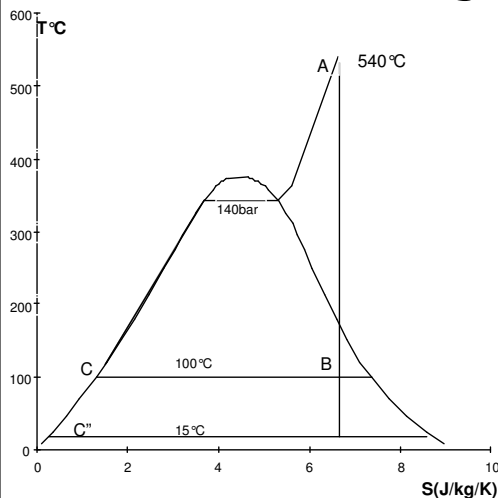
- Vapeur 140 bar 540°C ( $h_a=3432\text{kJ/kg}$ ;  $s_a=6.529\text{ kJ/kg/K}$ )
- Condenseur 0.017 bar, 15°C ( $h'_0=62.8\text{ kJ/kg}$ ;  $s'_0=0.224\text{ kJ/kg/K}$ )
- Turbine idéale (isentropique)
- On néglige le travail des pompes
  
- Débit de vapeur :  $m=Q/(h_a-h'_0)=104.7\text{ kg}$
- Exergie vapeur :  $e_v=m((h_a-h'_0)-T_0(s_a-s'_0))=162628\text{ kJ}$   
(39.6%  $e_1$ )
- Pertes irréversibilité :  $e_2-e'-e_v=91288\text{ kJ}$  (22.2%  $e_1$ )
- Travail utile :  $W=e_v$
- Rendement exergétique :  $\eta_{ex}=e_v/e_1=41\%$
- Rendement thermique :  $\eta_{th}=e_v/P=41.3\%$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

50

## Production combinée : cas de l'échange monoétagé



### ■ BUT

- ◆ réduire irréversibilité transfert gaz-eau
- ◆ insérer un cycle moteur

↪ Rapproche → transfert thermoénergétique

BCC'' : échange avec eau (15°C → 100°C)

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

51

## Cas de l'échange monoétagé

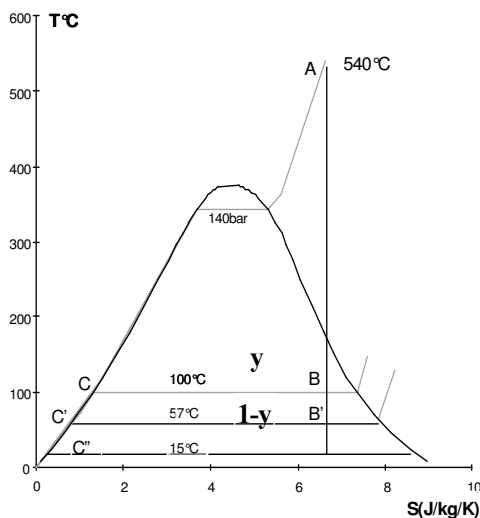
- Pertes (cfr cas précédent)
  - Combustion : 147710 kJ (35.9% de  $e_1$ )
  - transfert → vapeur : 91288 kJ (22.2% de  $e_1$ )
  - Cheminée : 9404 kJ (2.3% de  $e_1$ )
- Débit vapeur:  $m=Q/(h_a-h'_0)= 104.7$  kg
- Travail réversible vapeur (source froide à  $T_c$ ):  $W=e'_v=m((h_a-h'_c)-T_0(s_a-s'_c))=111518$  kJ (27.1%  $e_1$ )
- Chaleur :  $Q_e=(P-H')-e'_v=241348$  kJ
- Exergie eau :  $e_e=29903$  kJ (7.3% de  $e_1$ )
- Exergie vapeur :  $e_B=e_v-e'_v=162628-111518=51110$  kJ
- Perte transfert vapeur-eau :  $e_v-e'_v-e_e=21206$  kJ (5.2% de  $e_1$ )
- Rendement exergétique :  $\eta_{ex}=(e'_v+e_e)/e_1=34.4\%$
- Rendement thermique :  $\eta_{th}=(Q_e+e'_v)/P=89.6\%$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

52

## Cas de l'échange biétagé



↳ Réduire irréversibilité de l'échange entre la vapeur détendue qui se condense et l'eau qui se réchauffe

↳ On réchauffe l'eau en deux étapes tq  $Q_1+Q_2=Q_e$

↳  $m=Q/(h_a-h'_0)= 104.7$  kg

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

53

## Cas de l'échange biétagé

$$\Rightarrow Q_1 + Q_2 = Q_e$$

$Q_1$  réchauffe l'eau de 15°C à 57.5°C en condensant B'

$Q_2$  réchauffe l'eau de 57.5°C à 100°C en condensant B

$$\Rightarrow Q_1 = my(h_B - h_{C'}) = 222731y$$

$$Q_2 = m(1-y)(h_B - h_{C''}) + my(h_{C'} - h_{C''}) = (1-y)198375 + 18628$$

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow y = 0.5153$$

$\Rightarrow$  Travail réversible ( $T_C = 100^\circ\text{C}; T_{C'} = 57.5^\circ\text{C}$ )

$$AB : W_1 = y(e_A - e_B) = ((h_a - h_C) - T_C(s_a - s_C)) = 57467 \text{ kJ}$$

$$AB' : W_2 = (1-y)(e_A - e_{B'}) = ((h_a - h_{C'}) - T_{C'}(s_a - s_{C'})) = 68041 \text{ kJ}$$

$\Rightarrow$  Travail réversible total :

$$W = W_1 + W_2 = 125508 \text{ kJ (30.5\% de } e_1)$$

## Cas de l'échange biétagé

$\Rightarrow$  Chaleur :

$$Q'_e = (P - H') - W = 227357 \text{ kJ}$$

$\Rightarrow$  Exergie eau :

$$e'_e = Q'_e / (h_e - h'_0) ((h_e - h'_0) - T_0(s_e - s'_0)) = 28169 \text{ kJ}$$

(6.8% de  $e_1$ )

$\Rightarrow$  Perte transfert vapeur-eau :

$$e_a - (W_1 + W_2) - e'_e = 8950 \text{ kJ (2.2\% de } e_1)$$

$\Rightarrow$  Rendement thermique :

$$\eta_{th} = (Q'_e + W_1 + W_2) / P = 89.6\%$$

$\Rightarrow$  Rendement exergetique

$$\eta_{ex} = (W_1 + W_2 + e'_e) / e_1 = 37.4\%$$

## Bilan exergétique de la production combinée

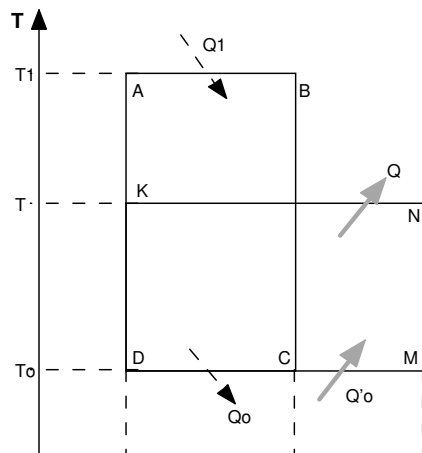
<i>En % de l'exergie du combustible</i>	Cas monoétagé	Cas biétagé
Irréversibilité de la combustion	35,9%	35,9%
Irréversibilité de la transmission gaz-vapeur	22,2%	22,2%
Travail récupérable	27,1%	30,5%
Irréversibilité de la transmission vapeur-eau	5,2%	2,2%
Exergie de l'eau chaude	7,3%	6,8%
Perte à la cheminée	2,3%	2,3%
Rendement thermique	89,6%	89,6%
Rendement exergétique	34,4%	37,4%

## Chauffage électrique

- Centrale idéale :  $W=162628$  KJ
- ↳ électricité=exergie pure
- Chauffage eau (15°C-100°C) – effet Joule
- Exergie de l'eau
 
$$e''_e = W / (h_e - h'_0) ((h_e - h'_0) - T_0 (s_e - s'_0)) = 20150$$
 kJ
- ↳ Rendement thermique :
 
$$\eta_{th} = W/P = 39.6\%$$
- ↳ Rendement exergétique
 
$$\eta_{ex} = e''_e / e_1 = 4.9\%$$
- /\! chauffage direct classique : rappel

$$\eta_{th} = 89.6\% \quad \eta_{ex} = 10.6\%$$

# Chauffage thermodynamique : Pompe à chaleur monoétagée



- Cycle de Carnot ABCD
    - $W$
    - $Q_0$ $Q_1 \rightarrow$ 
    - $W$
    - $Q_0$ $\eta = W/Q_1; Q_0/Q_1 = T_0/T_1$   
 $\Rightarrow \eta = (T_1 - T_0)/T_1$
  - Cycle de Carnot inversé KLMN
    - $Q'_0$
    - $W$ $\rightarrow Q$
  - Coefficient de performance  
 $\varepsilon = Q/W$
- $Q/Q_0 = T/T_0$   
 $\Rightarrow \varepsilon = T/T - T_0$

# Chauffage par pompe à chaleur

- En associant les deux cycles : pompe à chaleur

$$W = Q_1(T_1 - T_0)/T_1$$

$$Q_0 = Q_1 T_0/T_1$$

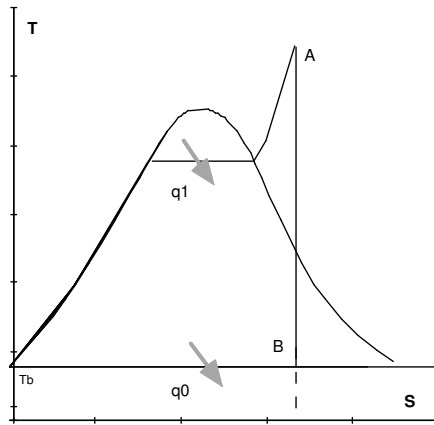
$$Q = \varepsilon W = WT/(T - T_0)$$

$$\Rightarrow Q = Q_1 T/T_1 (T_1 - T_0)/(T - T_0)$$

- ⇒ Si  $T_0 < T < T_1$ , on démontre aisément que

$$Q > Q_1$$

## Chauffage thermodynamique



■ Moteur=cycle de Hirn

■ Chaleur

◆ Reçue de la chaudière

$$Q_1 = h_a - h'_0$$

◆ Cédée au condenseur

$$Q_0 = T_0(s_A - s'_0)$$

■  $W = Q_1 - Q_0$

■  $\eta = W/Q_1 = 1 - Q_0/Q_1$   
 $= 1 - T_0(s_A - s'_0)/(h_a - h'_0)$   
 $= 1 - T_0/T_m$

$T_m$ : température  
moyenne intégrée

$$T_m = (h_a - h'_0) / (s_A - s'_0)$$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

60

## Pompe à chaleur monoétagée

$$T_0 = 15^\circ\text{C} \quad P_0 = 140 \text{ bar}$$

$$h'_0 = 62.8 \text{ kJ/kg}$$

$$s'_0 = 0.224 \text{ kJ/kg/K}$$

$$T_a = 540^\circ\text{C}$$

$$P_a = 140 \text{ bar}$$

$$h_a = 3432.7 \text{ kJ/kg}$$

$$s_a = 6.529 \text{ kJ/kg/K}$$

➤  $T_m = 534.5 \text{ K} = 261^\circ\text{C}$

➤  $\eta_c = 1 - T_0/T_m = 46.1\%$

➤ Correction perte cheminée :  $\eta = \eta_c(Q - H')/Q = 40.9\%$

Pompe à chaleur=cycle de Carnot  $T = 100^\circ\text{C}$

➤  $\varepsilon = 373/(373 - 288) = 4.39$

➤ Chaleur utile :  $Q' = \varepsilon W = \varepsilon \eta Q = 1.795 Q$

➤ Exergie de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  :

$$e''_e = Q' / ((h_e - h'_0) - T_0(s_e - s'_0)) = 78478 \text{ kJ}$$

↪ Rendement thermique :

$$\eta_{th} = Q'/P = 160.8\%$$

↪ Rendement exergétique

$$\eta_{ex} = e''_e / e_1 = 19.1\%$$

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

61

## Pompe à chaleur biétagée

$$\Rightarrow Q'_1 + Q'_2 = Q$$

$Q'_1$  chauffe l'eau de 15°C à 57.5°C par 1<sup>ère</sup> PAC

$Q'_2$  chauffe l'eau de 57.5°C à 100°C par 2<sup>ème</sup> PAC

$$Q'_1 = \varepsilon W_1 = 330.6 / (330.6 - 288) \quad W_1 = 7.78 \quad W_1$$

$$Q'_2 = \varepsilon W_2 = 373 / (373 - 288) \quad W_2 = 4.39 \quad W_2$$

$$Q'_1 = Q'_2 \quad (c_p \text{ eau} \cong \text{constant}) \Rightarrow W_2 = 1.772 W_1$$

$$\Rightarrow W = W_1 + W_2 = 2.272 W_1 = (Q - H') \eta$$

(travail du cycle moteur)

$$\Rightarrow W_1 = 51046 \text{ kJ} \text{ et } W_2 = 90453 \text{ kJ}$$

$$\Rightarrow Q' = Q'_1 + Q'_2 = 794227 \text{ kJ}$$

## Pompe à chaleur biétagée

$\Rightarrow$  Le débit d'eau réchauffé est

$$m_e = Q' / (h_e - h'_0) = 2230 \text{ kg}$$

$\triangleright$  Exergie de l'eau à 100°C :

$$e''_e = Q' / (h_e - h'_0) ((h_e - h'_0) - T_0 (s_e - s'_0)) = 98418 \text{ kJ}$$

$\Rightarrow$  Rendement thermique :

$$\eta_{th} = Q' / P = 202\%$$

$\Rightarrow$  Rendement exergetique

$$\eta_{ex} = e''_e / e_1 = 28.7\%$$

$\Rightarrow$  irréversibilité réduite: écart de T limité

$\Rightarrow$  Cas limite:  $\infty$  étages:  $\eta_{ex} \rightarrow \eta_{centrale} (41\%)$

## Comparaison

Production combinée  $\Leftrightarrow$  chauffage thermodynamique

- ◆  $T_1$  source chaude
- ◆  $T$  chauffage
- ◆  $T_0$  ambiance

### ■ Cas 1 : $Q_1 \rightarrow$ cycle de Carnot moteur

$$W = Q_1 (T_1 - T_0) / T_1$$

On utilise  $W$  pour une PAC

$$Q_2 = T / T_1 (T_1 - T_0) / (T - T_0) Q_1$$

## Comparaison

Production combinée  $\Leftrightarrow$  chauffage thermodynamique

### ■ Cas 2 : $Q_1 \rightarrow$ production combinée

$$W' = Q_1 (T_1 - T) / T_1$$

$$Q'_2 = T / T_1 Q_1 \quad \text{chaleur utile}$$

On utilise  $W'$  pour une PAC

$$Q''_2 = W' T / (T - T_0) = T / T_1 (T_1 - T) / (T - T_0) Q_1$$

$$\text{Globalement } Q_2 = Q'_2 + Q''_2$$

$$\Rightarrow Q_2 = T / T_1 (T_1 - T_0) / (T - T_0) Q_1$$

- Les deux procédés sont théoriquement équivalents
- En pratique: autres sources de pertes
  - ◆ Production combinée : transport de chaleur
  - ◆ Chauffage thermod. = transport électricité

## Comparaison des différents processus

	Rendement thermique	Rendement exergetique
Chauffage direct	89,6%	10,6%
Centrale électrique	41,3%	39,6%
Production combinée	89,6%	34,4%
Production combinée (2 niveaux)	89,6%	37,4%
Chauffage électrique	39,6%	4,9%
Chauffage thermodynamique	160%	19,1%
Chauffage thermodynamique (2 niveaux)	202%	28,7%

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

66

## Répartition de l'exergie disponible dans les gaz

	Chauffage direct	Centrale électrique	Production combinée
Irréversibilité de transfert primaire (gaz vers vapeur)	51,1%	22,2%	22,2%
Travail maximum récupérable	-	39,6%	27,1%
Irréversibilité de transfert secondaire (vapeur vers eau)	-	-	5,2%
Exergie de l'eau	10,6%	-	7,3%

Novembre 2007

Echangeurs de chaleur : réseaux et URE

67