

# Une Méthode pour Représenter et Caractériser les Echanges d'Exergie : Le Modèle du Levier

*Ahmed LAOUIR*

*Université de Jijel*

*Département de Mécanique*

*ahmed\_adr@yahoo.fr BP 98- 18000 Jijel Algérie*

---

*Journée Exergie – ENSTA - Paris, 20 mars 2008*

# Plan de l'exposé

- ❖ Exergie et bilan(s) d'exergie
- ❖ Différentes approches en analyses exergetique
- ❖ Analogie avec l'équilibre d'un levier
- ❖ Critères de performance possibles
- ❖ Application à une distillation
- ❖ Conclusion

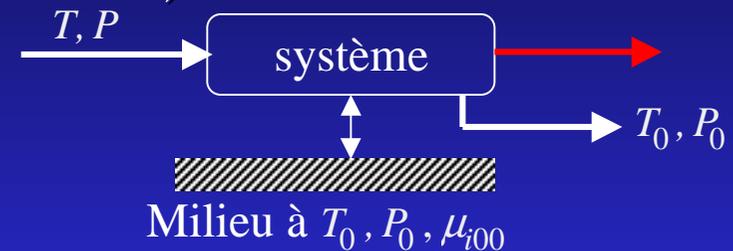
# L'exergie

- Travail réversible accompagnant toute interaction plus ou moins libre avec le milieu

- Équilibre partiel avec le milieu

→ *Exergie primaire (physique/réactionnelle)*

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

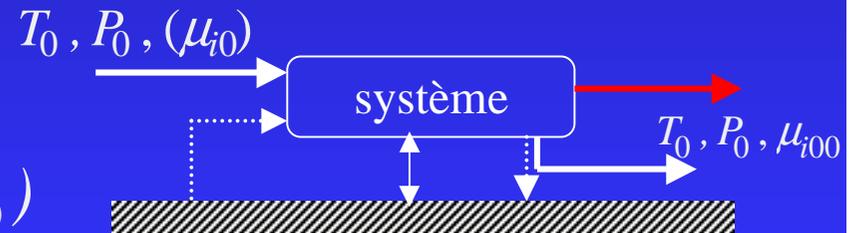


- Équilibre total : interaction libre avec le milieu

→ *Exergie secondaire (réactionnelle/diffusionnelle)*

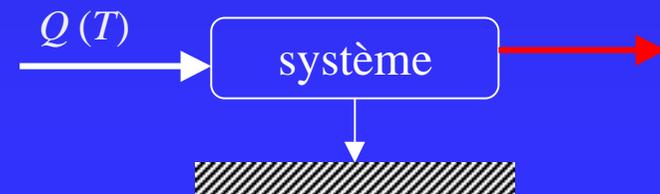
$$ex = (h_0 - h_{00}) - T_0(s_0 - s_{00})$$

$$ex \text{ diffusionnelle: } \sum_i \frac{x_i}{M_i} (\mu_{i0} - \mu_{i00})$$



- Exchange thermique avec le milieu

$$ex = Q(1 - T_0/T)$$



# Bilan(s) d'exergie...

- Exergie : Grandeur relative dans la mesure où,

\*  $T_0$ ,  $P_0$  et  $\mu_{i00}$  sont variables

\*\* l'équilibre est partiel ou total

- Bilan réduit d'exergie

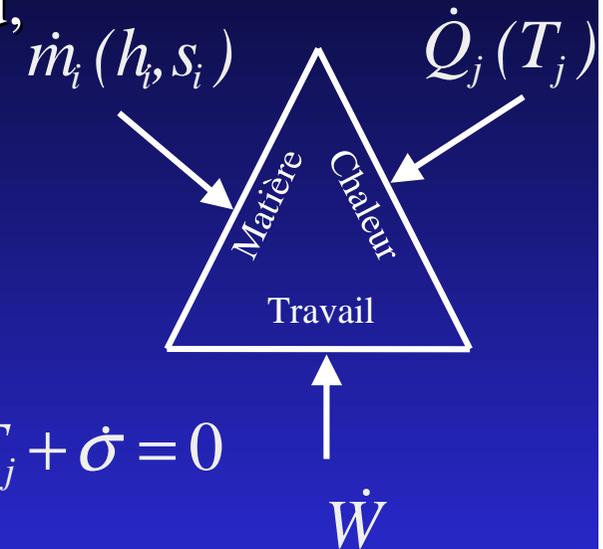
$$\sum_i \dot{m}_i h_i + \sum \dot{Q}_j + \dot{W} = 0 ; \quad \sum_i \dot{m}_i s_i + \sum \dot{Q}_j / T_j + \dot{\sigma} = 0$$

D'où 
$$\sum_i \dot{m}_i (h_i - T_0 s_i) + \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) + \dot{W} - T_0 \dot{\sigma} = 0$$

- Exergies (*Travaux mini/maxi*) de  $k$  processus,

$$\sum_i \dot{m}_i (h_i - T_0 s_i) = \sum_k \Delta \dot{H}_k - T_0 \Delta \dot{S}_k = \sum_k \dot{E}x_k$$

$$\sum_k \dot{E}x_k + \sum_j \dot{Q}_j \theta_j + \dot{W} - T_0 \dot{\sigma} = 0$$



## ...Bilan(s) d'exergie

### ■ Bilan vrai d'exergie

- Exergie (primaire ou totale) de chaque débit  $i$ ,

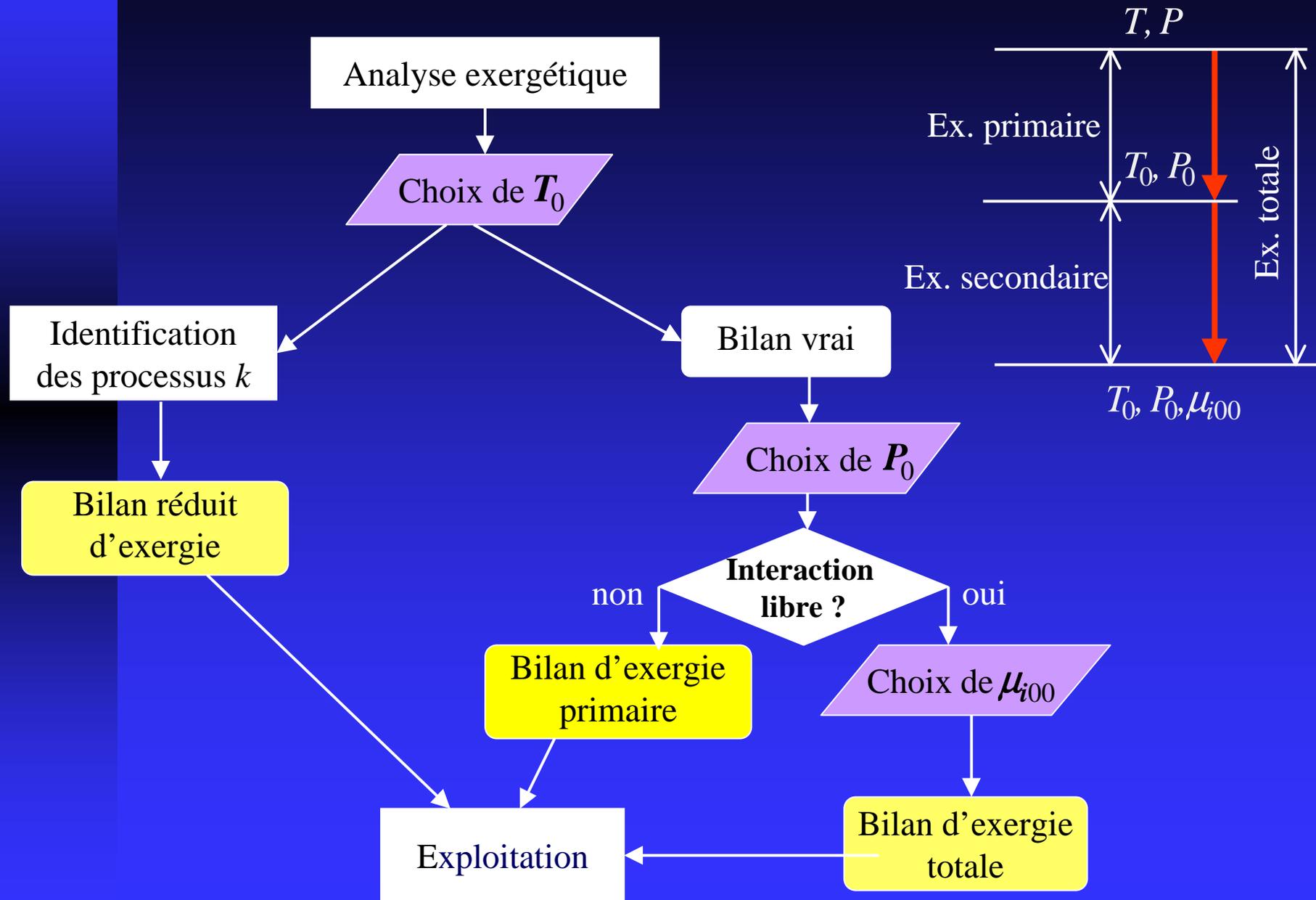
$$\sum_i \dot{m}_i [(h_i - h_{i0}) - T_0 (s_i - s_{i0})] = \sum_i \Delta \dot{H}_i - T_0 \Delta \dot{S}_i = \sum_i \dot{E}x_i$$

- Nota Bene :  $\sum_k \dot{E}x_k = \sum_i \dot{E}x_i + \sum_k \dot{E}x_k(T_0, P_0)$

où  $\dot{E}x_k(T_0, P_0) = \dot{E}x_{k0}$  exergie d'interaction du processus  $k$  sous les conditions du milieu (= 0 avec les corps purs)

$$\sum_i \dot{E}x_i + \sum_k \dot{E}x_{k0} + \sum_j \dot{Q}_j \theta_j + \dot{W} - T_0 \dot{\sigma} = 0$$

# Différentes approches en analyse exergetique



# Analogie avec l'équilibre d'un levier

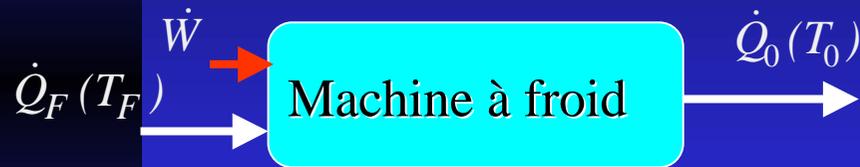
- On définit une pseudo température : la température entropique  $T^* = \Delta\dot{H} / \Delta\dot{S}$  et le facteur de Carnot correspondant  $\theta^* = 1 - T_0 / T^*$ 
  - De sorte que  $\dot{E}_x = \Delta\dot{H} - T_0\Delta\dot{S} = \Delta\dot{H}\theta^*$
- Lois d'équilibre d'un système plan de forces
$$\sum Forces = 0 \quad \rightarrow \text{équilibre en translation}$$
$$\sum Moments = 0 \quad \rightarrow \text{équilibre en rotation}$$
- Lois thermodynamiques régissant les systèmes
$$\sum Energies = 0 \rightarrow \sum \Delta\dot{H} + \sum \dot{Q} + \dot{W} = 0$$
$$\sum Exergies = 0 \rightarrow \sum \Delta\dot{H}\theta^* + \sum \dot{Q}\theta + \dot{W} - \dot{E}_{x_d} = 0$$
- Analogie :
  - Equilibre des forces = Premier principe
  - Equilibre des moments de forces = Deuxième principe

# Representation de quelques systèmes



$$\dot{Q}_H - \dot{Q}_0 - \dot{W} = 0$$

$$\dot{Q}_H \theta_H - \dot{W} - \dot{E}x_d = 0$$



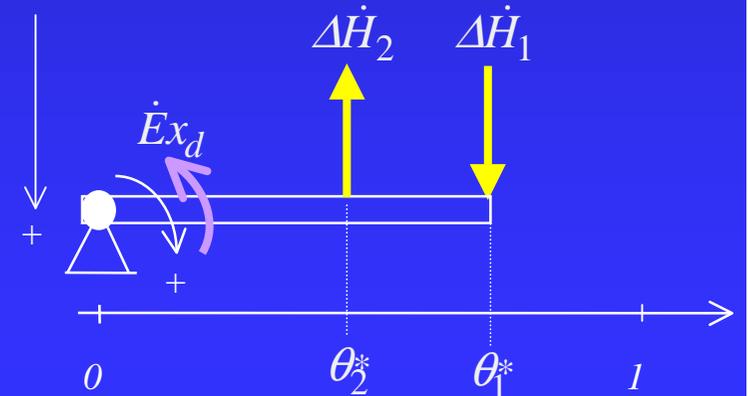
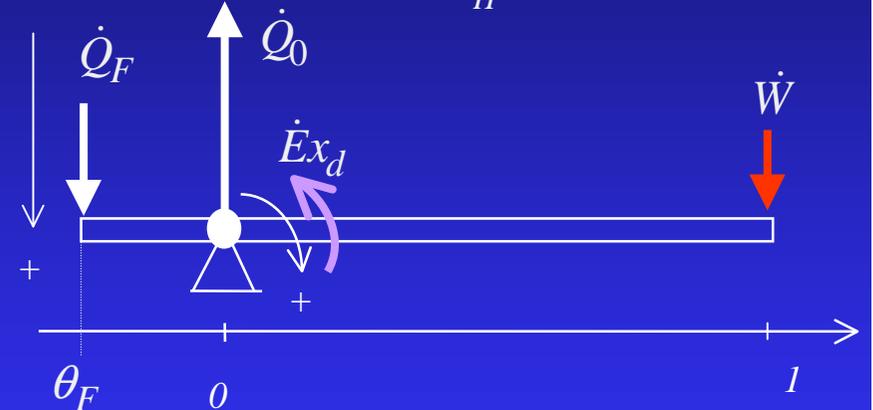
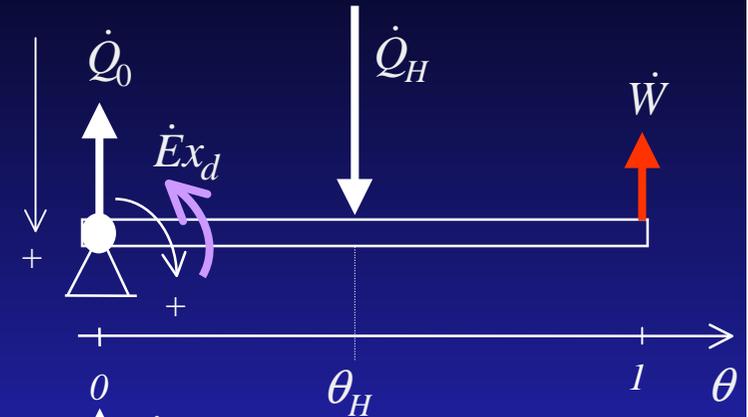
$$\dot{Q}_F - \dot{Q}_0 + \dot{W} = 0$$

$$\dot{W} - \dot{Q}_F \theta_F - \dot{E}x_d = 0$$



$$\Delta \dot{H}_1 - \Delta \dot{H}_2 = 0$$

$$\Delta \dot{H}_1 \theta_1^* - \Delta \dot{H}_2 \theta_2^* - \dot{E}x_d = 0 \quad (\text{Bilan réduit})$$



# Critères de performances possibles

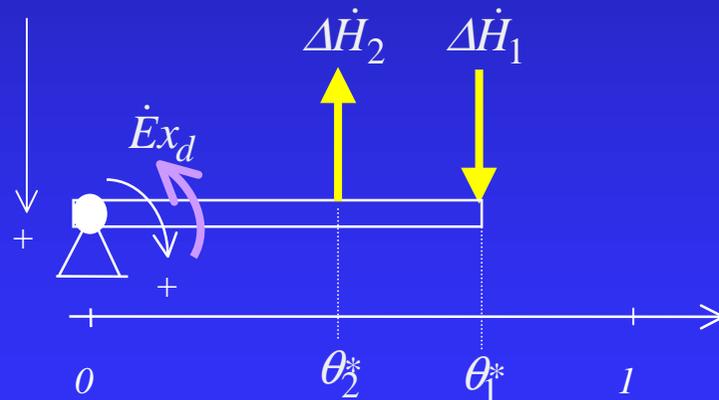
- Rendement exergetique de transfert

$$\eta_{ex}^t = \frac{\sum [\text{Exergies sortantes } (< 0)]}{\sum [\text{Exergies entrantes } (> 0)]}$$

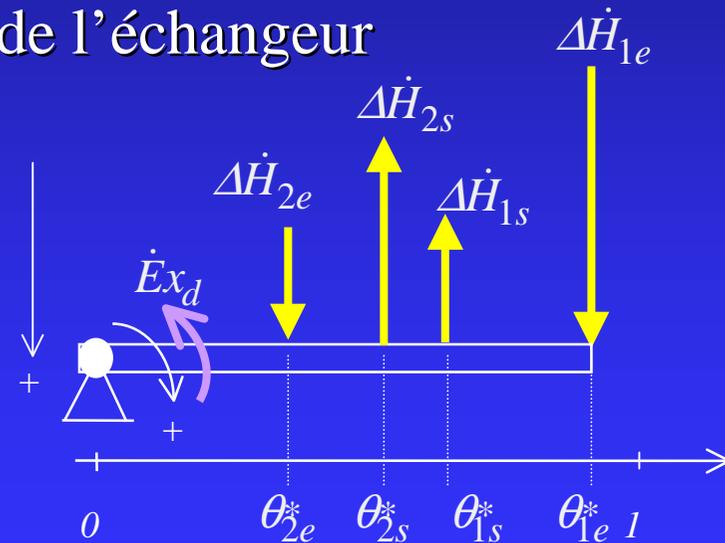
- Rendement exergetique de conversion

$$\eta_{ex}^c = \frac{\sum [\text{Exergies utiles produites}]}{\text{Exergie nette consommée}}$$

- Les valeurs peuvent varier suivant l'approche adoptée;  
Bilan d'exergie réduit ou vrai : cas de l'échangeur



$$\eta_{ex}^t = \frac{\Delta \dot{H}_1 \theta_1^*}{\Delta \dot{H}_2 \theta_2^*}$$



$$\eta_{ex}^t = \frac{\Delta \dot{H}_{1s} \theta_{1s}^* + \Delta \dot{H}_{2s} \theta_{2s}^*}{\Delta \dot{H}_{1e} \theta_{1e}^* + \Delta \dot{H}_{2e} \theta_{2e}^*}$$

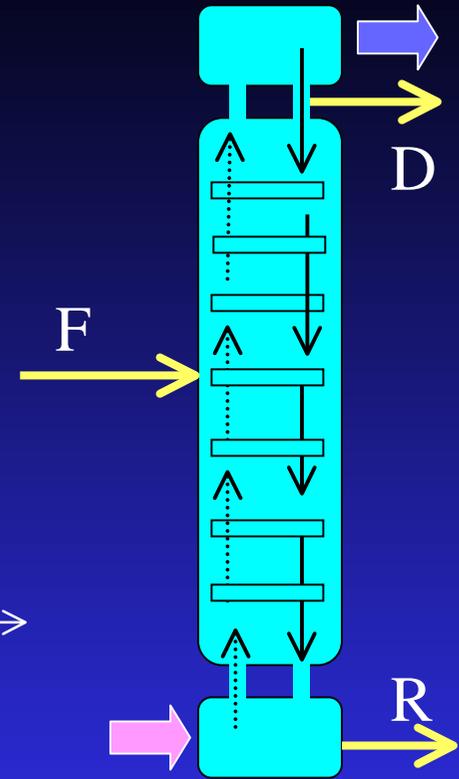
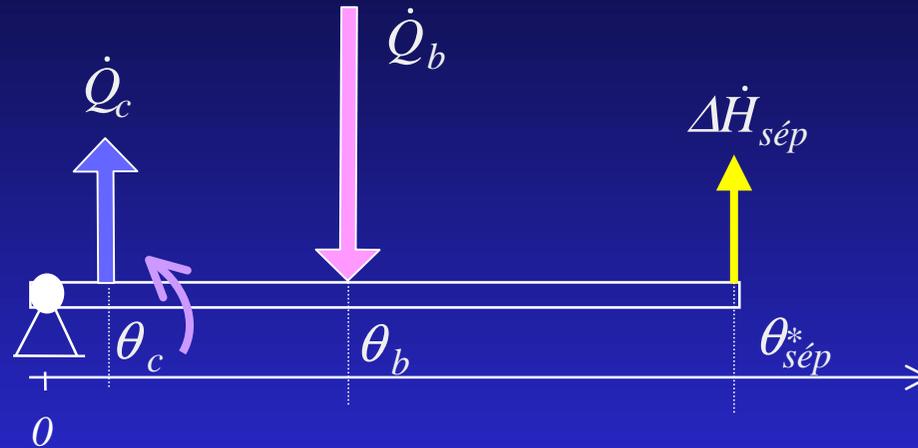
# Application à une distillation

En bilan réduit

$$\dot{Q}_b \theta_b - \dot{Q}_c \theta_c - \dot{E}x_{sép} - \dot{E}x_d = 0$$

$$\eta_{ex}^t = \frac{\dot{Q}_c \theta_c + \dot{E}x_{sép}}{\dot{Q}_b \theta_b}$$

$$\eta_{ex}^c = \frac{\dot{E}x_{sép}}{\dot{Q}_b \theta_b - \dot{Q}_c \theta_c}$$

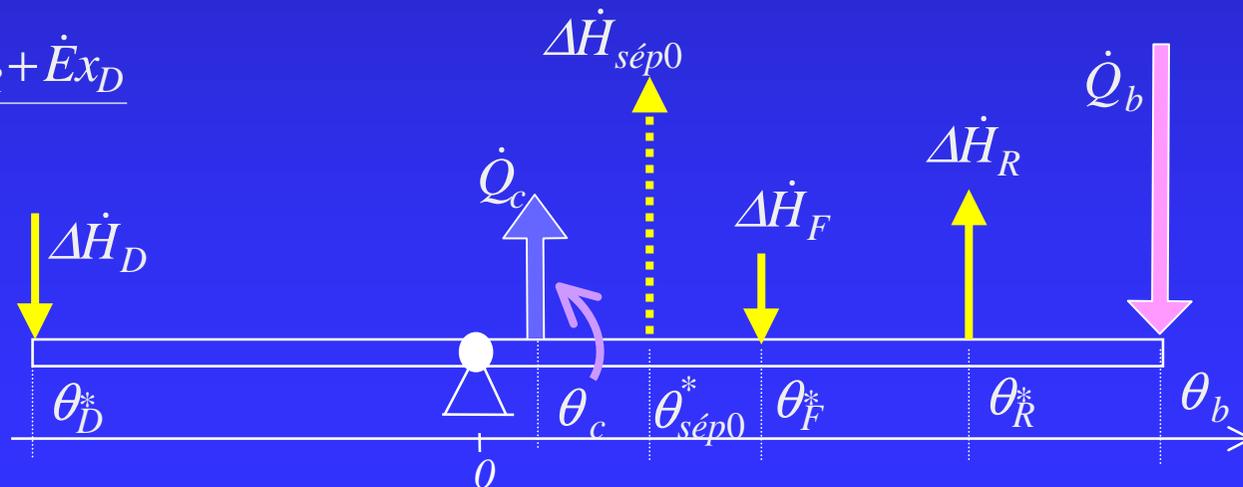


En bilan vrai

$$\dot{Q}_b \theta_b - \dot{Q}_c \theta_c + \dot{E}x_F - \dot{E}x_D - \dot{E}x_R - \dot{E}x_{sép0} - \dot{E}x_d = 0$$

$$\eta_{ex}^t = \frac{\dot{Q}_c \theta_c + \dot{E}x_{sép0} + \dot{E}x_R + \dot{E}x_D}{\dot{Q}_b \theta_b + \dot{E}x_F}$$

$$\eta_{ex}^c = \frac{\dot{E}x_{sép}}{\dot{Q}_b \theta_b - \dot{Q}_c \theta_c}$$



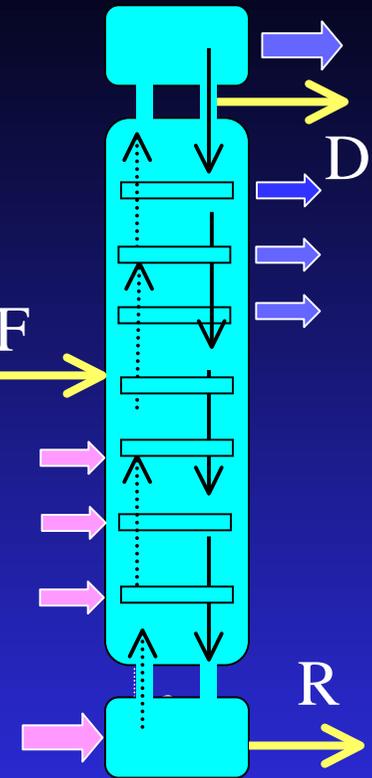
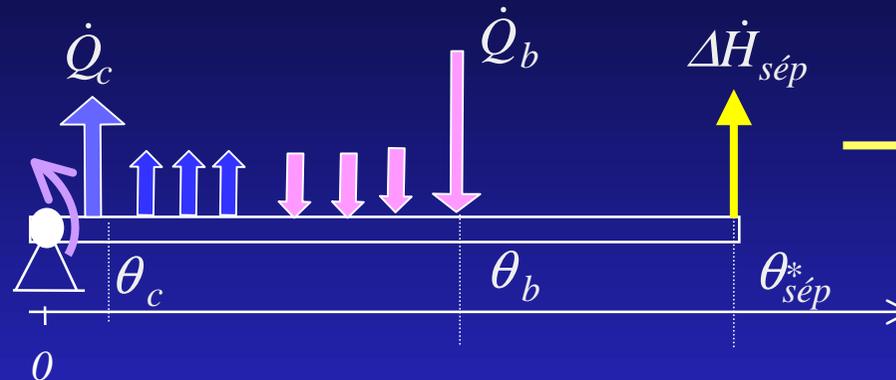
# Diabatisation de la colonne

En bilan réduit

$$\sum(\dot{Q}\theta)_{\acute{e}p} - \sum(\dot{Q}\theta)_{enr} - \dot{E}x_{s\acute{e}p} - \dot{E}x_d = 0$$

$$\eta_{ex}^t = \frac{\sum(\dot{Q}\theta)_{enr} + \dot{E}x_{s\acute{e}p}}{\sum(\dot{Q}\theta)_{\acute{e}p}}$$

$$\eta_{ex}^c = \frac{\dot{E}x_{s\acute{e}p}}{\sum(\dot{Q}\theta)_{\acute{e}p} - \sum(\dot{Q}\theta)_{enr}}$$

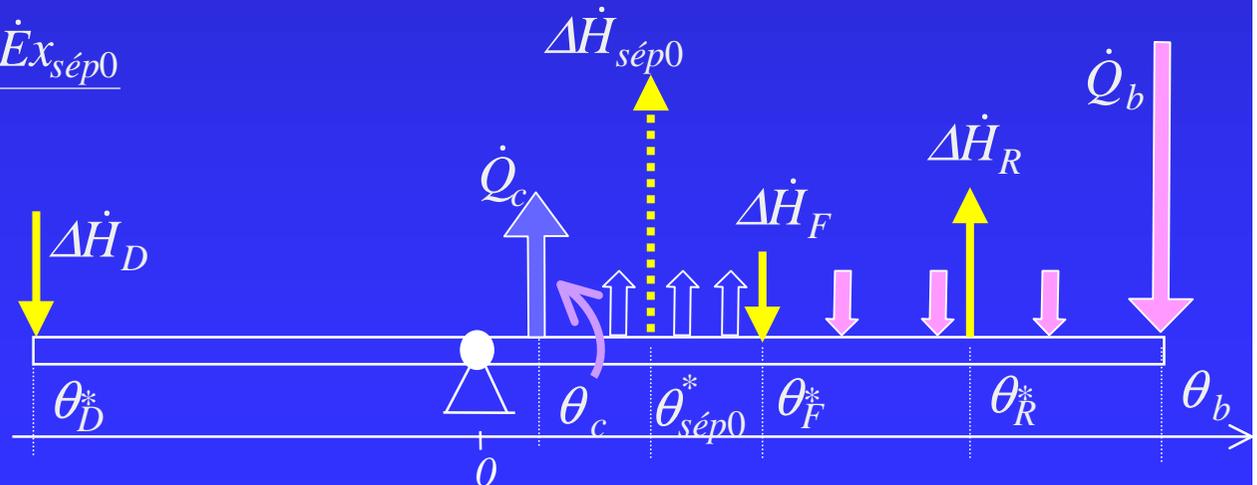


En bilan vrai

$$\sum(\dot{Q}\theta)_{\acute{e}p} - \sum(\dot{Q}\theta)_{enr} + \dot{E}x_F - \dot{E}x_D - \dot{E}x_R - \dot{E}x_{s\acute{e}p0} - \dot{E}x_d = 0$$

$$\eta_{ex}^t = \frac{\sum(\dot{Q}\theta)_{enr} + \dot{E}x_R + \dot{E}x_D + \dot{E}x_{s\acute{e}p0}}{\sum(\dot{Q}\theta)_{\acute{e}p} + \dot{E}x_F}$$

$$\eta_{ex}^c = \frac{\dot{E}x_{s\acute{e}p}}{\sum(\dot{Q}\theta)_{\acute{e}p} - \sum(\dot{Q}\theta)_{enr}}$$



# Séparation d'un mélange Ammoniac/Eau sous 16 bars

$T_0 = 25\text{ °C}$   
 $P_0 = 1\text{ bar}$

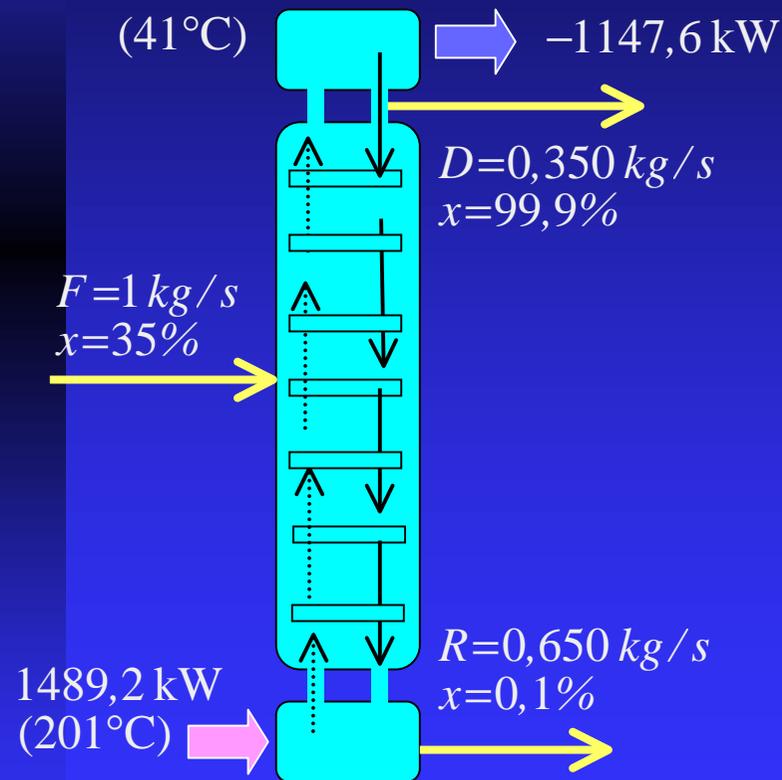
$$\Delta\dot{H}_F = 281,2\text{ kW} ; \theta_F^* = 0,163$$

$$\Delta\dot{H}_D = 402,6\text{ kW} ; \theta_D^* = -0,281$$

$$\Delta\dot{H}_R = 489,3\text{ kW} ; \theta_R^* = 0,218$$

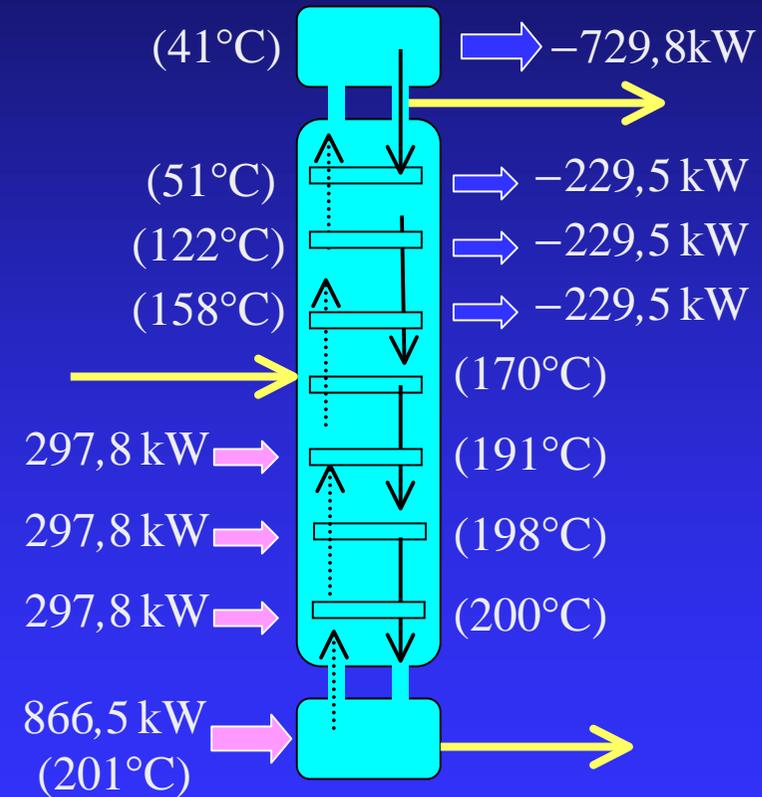
$$\Delta\dot{H}_{sep} = 341,6\text{ kW} ; \theta_{sep}^* = 0,665$$

$$\Delta\dot{H}_{sep0} = 536,1\text{ kW} ; \theta_{sep0}^* = 0,063$$



$$\dot{E}x_d = 267\text{ kW} \quad \eta_{ex}^t = 51\% \quad \eta_{ex}^c = 46\%$$

$(\eta_{ex}^t = 52\%)_{\text{vrai}}$



$$\dot{E}x_d = 238\text{ kW} \quad \eta_{ex}^t = 63\% \quad \eta_{ex}^c = 48\%$$

$(\eta_{ex}^t = 63\%)_{\text{vrai}}$

# Conclusion

- ❖ Importance d'énoncer les choix arrêtés dans tout travail relevant de l'analyse exergétique.
- ❖ Différences avec les bilans d'énergie et d'entropie:
  - Sens de flux peut être  $\neq$  Sens d'exergie correspondante.
  - $\exists$  une exergie d'interaction (nulle avec les corps purs)
- ❖ Bilans d'exergie :
  - Vrai : cohérent avec les définitions ; nécessite plus de calcul.
  - Réduit : Plus simple et souvent suffisant pour l'analyse.
- ❖ Le modèle du levier :
  - Un moyen pour représenter des bilans d'énergie et d'exergie.
  - Apporte un discernement accru en analyse exergétique.
- ❖ La diabatisation de la distillation favorise davantage le transfert que la conversion → nécessité d'une intégration énergétique