

Journée micro/mini cogénération
3 Février 2016

La valorisation des chaleurs fatales : Méthodologie

Auteurs : M. FEIDT, S. CLINQUART, T. REGNIER

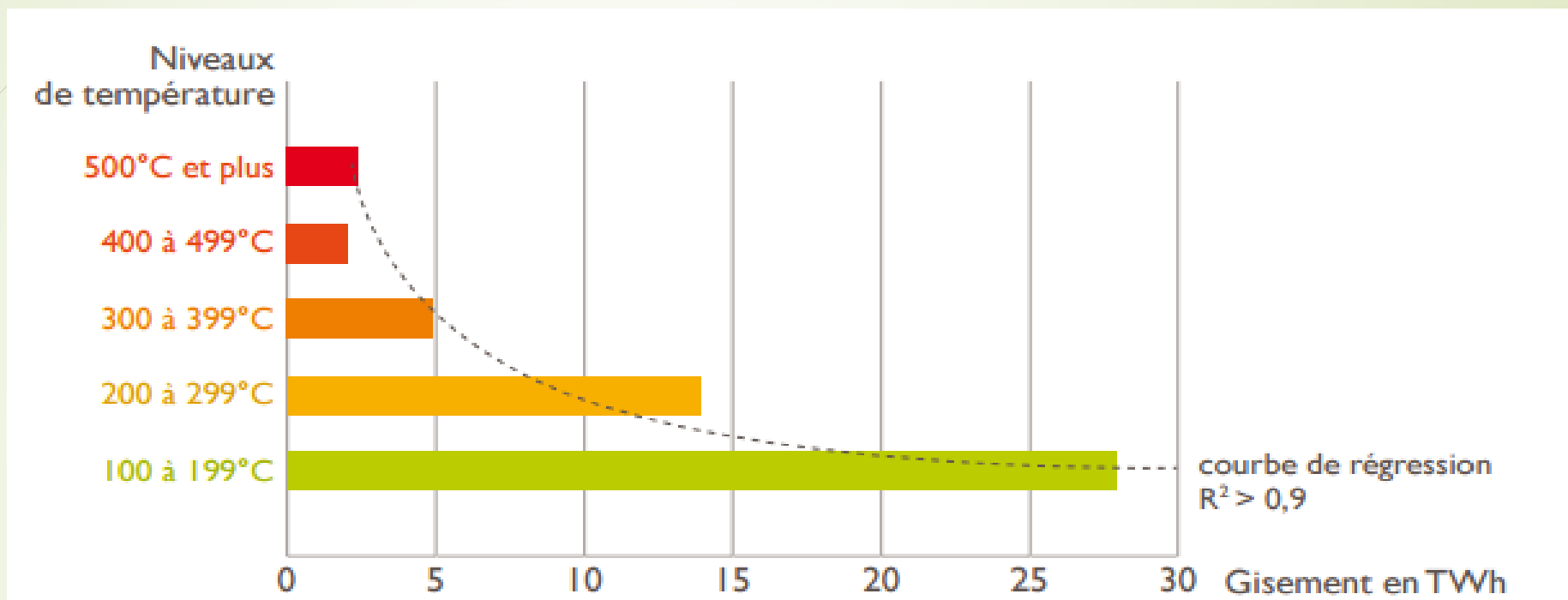
LEMTA, Univ. Lorraine; 2 avenue de la forêt de Haye 54518 VANDOEUVRE

michel.feidt@univ-lorraine.fr

PLAN DE L'EXPOSÉ

- I) Introduction : situation du sujet
- II) Valorisation simple effet
- III) Valorisation multiples effets
- IV) Conclusions - perspectives

I Introduction : situation du sujet



Chaleur fatale disponible à 100°C et plus dans l'industrie - ADEME

➤ Thermique

Valorisation : ➤ Mécanique (électrique)

➤ Autres

I Introduction : situation du sujet

➤ 3 moyens techniques essentielles pour valoriser :

- Echangeur de chaleur
- Pompe à chaleur
- Convertisseur mécanique/électrique dont ORC

➤ La question fondamentale :

Quelle solution de revalorisation optimise la valorisation de chaleur fatale?

I Introduction : situation du sujet

Formalisation :

T_{DS} (K) : Température de la disponibilité à la source de chaleur fatale (chaleur latente ; chaleur sensible)

T_u (K) : Température utile

T_0 (K) : Température ambiante (environnement ; ambiante)

\dot{m} (kg/s) : Débit massique

$\dot{m}C_p$ (W/K) : Débit calorifique

3 points de vue :

- Energétique : $v_i = 1$
- Exergétique : $v_i = 1 - \frac{T_0}{T}$ (ou $1 - \frac{T_0}{\tilde{T}}$)
- Economique : v_i (valeur économique)

II Valorisation simple effet (chaleur sensible)

II.1 HEX $T_u < T_{ui} < T_{u0}$ $T \in [T_0, T_{DS}]$

$$\text{Rendement : } \eta = \frac{v_{Qu} \dot{C}_u}{v_{QDS} \dot{C}_{DS}} \frac{T_{u0} - T_{ui}}{T_{DS} - T_0} = \frac{v_{Qu}}{v_{QDS}} \dot{C} \Delta u$$

➤ Energétiquement : rendement maximum à $\max(T_{u0} - T_{ui}) = T_{DS} - T_0$

➤ Exergétiquement : $\eta_{ex} = \frac{1 - \frac{T_0}{T_u}}{1 - \frac{T_0}{T_{DS}}} \dot{C} \Delta u$

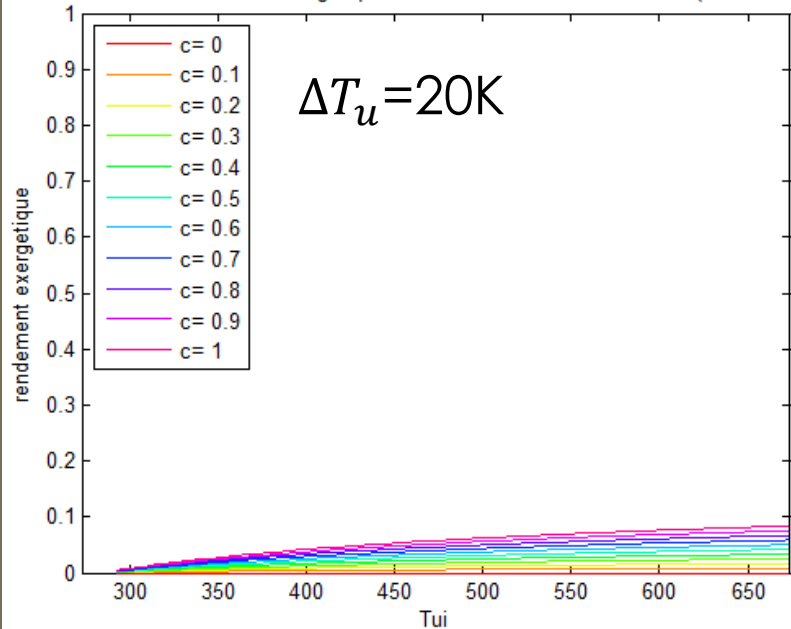
Décroissance de T_{ui} , croissance de T_{u0} .

II Valorisation simple effet (chaleur sensible)

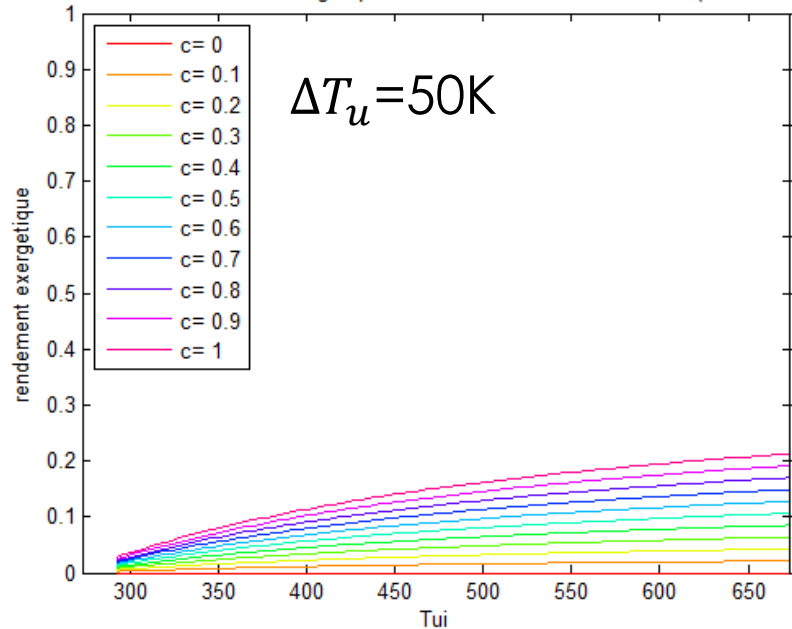
II.1 HEX $T_u < T_{ui} < T_{u0}$ $T \in [T_0, T_{DS}]$ $\Delta T_u = T_{u0} - T_{ui}$

$T_{DS} = 673 K$
 $T_0 = 293 K$

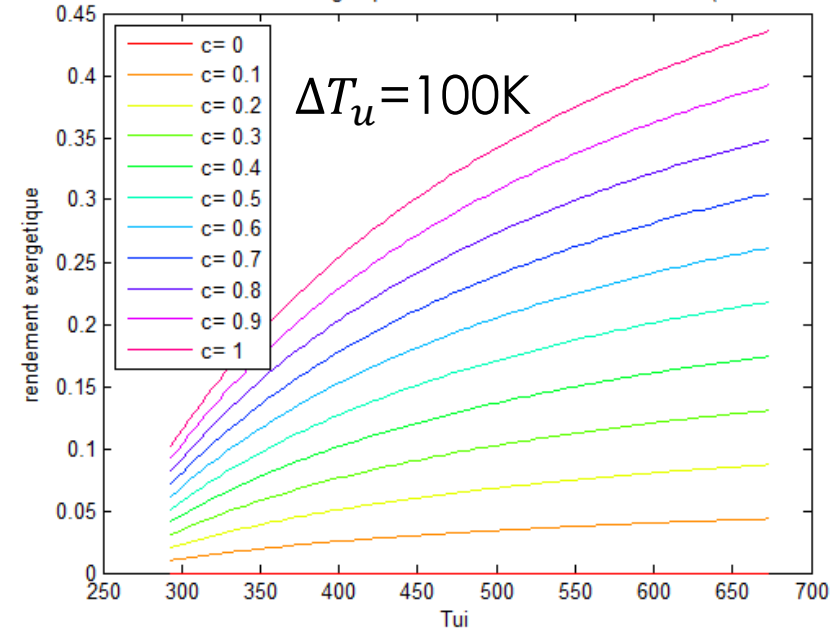
Evolution du rendement exergetique en fonction de T_{ui} à différents C ($T_{u0}=T_{ui}+20$)



Evolution du rendement exergetique en fonction de T_{ui} à différents C ($T_{u0}=T_{ui}+50$)



Evolution du rendement exergetique en fonction de T_{ui} à différents C ($T_{u0}=T_{ui}+100$)



Evolution du rendement éxergétique à différents \dot{C} pour différent cas de ΔT_u

II Valorisation simple effet (chaleur sensible)

II.2 PAC (endoréversible) : $T_u > T_{DS}$

Valorisation de toute la chaleur fatale :

$$T_{uo} = T_{ui} \sqrt[c]{\frac{T_{DS}}{T_0}}$$

► Analyse énergétique

$$\dot{W} = \dot{C}_u T_{ui} \left[\sqrt[c]{\frac{T_{DS}}{T_0}} - 1 \right] - \dot{C}_{DS} (T_{DS} - T_0)$$

\dot{W} , fonction décroissante de C.

Calcul d'extremum en T_{DS} :

$$T_{DS} = T_0 \left(\frac{1}{C} \frac{T_0}{T_{ui}} \right)^{\frac{1-C}{C}}$$

II Valorisation simple effet (chaleur sensible)

II.2 PAC (endoréversible) : $T_u > T_{DS}$

► Analyse éxergétique

$$\dot{E}_{xu} = \dot{C}_u T_{ui} \left(\sqrt{\frac{c T_{DS}}{T_0}} - 1 \right) - T_0 \dot{C}_u \frac{1}{C} \ln \frac{T_{DS}}{T_0}$$

Bénéfice éxergétique si $\dot{E}_{xu} > \dot{W}$:

$$\frac{T_{DS} - T_0}{T_0} > \ln \frac{T_{DS}}{T_0}$$

► Analyse économique

$$\dot{V}_u = v_u \dot{C}_u T_{ui} \left[\sqrt{\frac{c T_{DS}}{T_0}} - 1 \right]$$

$$\dot{V}_W = v_W \left[\dot{C}_u T_{ui} \left[\sqrt{\frac{c T_{DS}}{T_0}} - 1 \right] - \dot{C}_{DS} (T_{DS} - T_0) \right]$$

Bénéfice si $\frac{v_u}{v_W} > 1 - \frac{1}{C} \frac{T_{DS} - T_0}{T_{ui} \left[\sqrt{\frac{c T_{DS}}{T_0}} - 1 \right]}$

$\frac{v_u}{v_W}$ augmente si C diminue

III Valorisation multiples effets

III.1 Cascade d'HEX, chaleur sensible

➤ Analyse énergétique :

Cas utilisation totale des chaleurs fatales, sans pertes thermiques

Bilan énergie : $\sum_i \dot{Q}_{ui} = \dot{Q}_{DS}$

Bilan entropie : $\frac{\dot{Q}_{DS}}{T_{DS}} = \sum_i \frac{\dot{Q}_{ui}}{T_{ui}}$ (endoreversibilité)

➤ Rendement énergétique : $\eta_{en} = \frac{\sum_i \dot{Q}_{ui}}{\dot{Q}_{DS}} = 1$

III Valorisation multiples effets

III.1 Cascade d'HEX, chaleur sensible

► Analyse exergetique :

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{ui}}\right) \dot{Q}_{ui}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{DS}}\right) \dot{Q}_{DS}}$$

Tout calcul fait :

$$\eta_{Ex Q} = \frac{\widetilde{T}_{DS}}{\widetilde{T}_{DS} - T_0} \left[1 - \frac{T_0}{T_{DS} - T_0} \sum_i \frac{\dot{C}_{ui}}{\dot{C}_{DS}} \ln \left(\frac{T_{uio}}{T_{uii}} \right) \right]$$

III Valorisation multiples effets

III.1 Cascade d'HEX, chaleur sensible

► Analyse économique :

Bénéfice dans la valorisation thermique si :

"valeur chaleur utilisé" > "max valeur travail disponible"

$$v_{QDS} \dot{Q}_{DS} - \sum_i v_{Qui} \dot{Q}_{ui} > v_w \left(1 - \frac{T_0}{T_{DS}}\right) \dot{Q}_{DS}$$

Tout calcul fait :

$$v_{QDS} - \sum_i v_{Qui} \frac{C_{ui} \Delta T_{ui}}{C_{DS} \Delta T_{DS}} > v_w \frac{T_{DS} - T_0}{T_{DS}}$$

III Valorisation multiples effets

III.2 Cascade de PAC, chaleur latente

➤ Analyse énergétique :

Dépense énergétique : $\dot{W}_u = \sum_i \dot{W}_{ui} = \sum_i \dot{Q}_{ui} \left(\frac{T_{ui} - T_{DS}}{T_{ui}} \right)$

Cas utilisation totale des chaleurs fatales, sans pertes thermiques

Bilan énergie : $\sum_i \dot{Q}_{ui} = \dot{Q}_{DS} + \dot{W}_u$

Bilan entropie : $\frac{\dot{Q}_{DS}}{T_{DS}} = \sum_i \frac{\dot{Q}_{ui}}{T_{ui}}$ (endoreversibilité)

➤ Rendement énergétique : $\eta_{en} = 1$ (\dot{Q}_{DS} dépense)
 $= 1 + COP_{DS}$ (\dot{Q}_{DS} gratuit)

III Valorisation multiples effets

III.2 Cascade de PAC, chaleur latente

► Analyse exergetique :

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{ui}}\right) \dot{Q}_{ui}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{DS}}\right) \dot{Q}_{DS} + \dot{W}_u}$$

Tout calcul fait :

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_i \frac{T_{ui} - T_0}{T_{ui} - T_{DS}} \dot{W}_{ui}}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{DS}}\right) \dot{Q}_{DS} + \sum_i \dot{W}_{ui}}$$

η_{ex} décroissant de T_{ui}

Un optimum potentiel en \dot{W}_{ui} , à T_{ui} paramètres

III Valorisation multiples effets

III.2 Cascade de PAC, chaleur latente

- Analyse économique :

$$\frac{v_{ui}}{v_{Wi}} > \frac{T_{ui}}{T_{ui} - T_{DS}} \quad \forall \dot{Q}_{ui}, \dot{W}_{ui}$$

- La démarche en chaleur sensible est identique qu'en chaleur latente

III Valorisation multiples effets

III.3 Cycle ORC à l'amont de HEX utile

III.3.a En chaleur latente

- Analyse énergétique :

$$\dot{E}_u = \dot{Q}_{DS} - \dot{C}_{DS} T_0 \ln \left(\frac{T_u}{T_0} \right)$$

Fonction décroissante de T_u

- Analyse exergétique :

$$\dot{E}_{xu} = \dot{C}_{DS} (T_{DS} - T_0) - \dot{C}_{DS} T_0 \left[\frac{T_{DS}}{T_u} - 1 + \ln \left(\frac{T_u}{T_0} \right) \right]$$

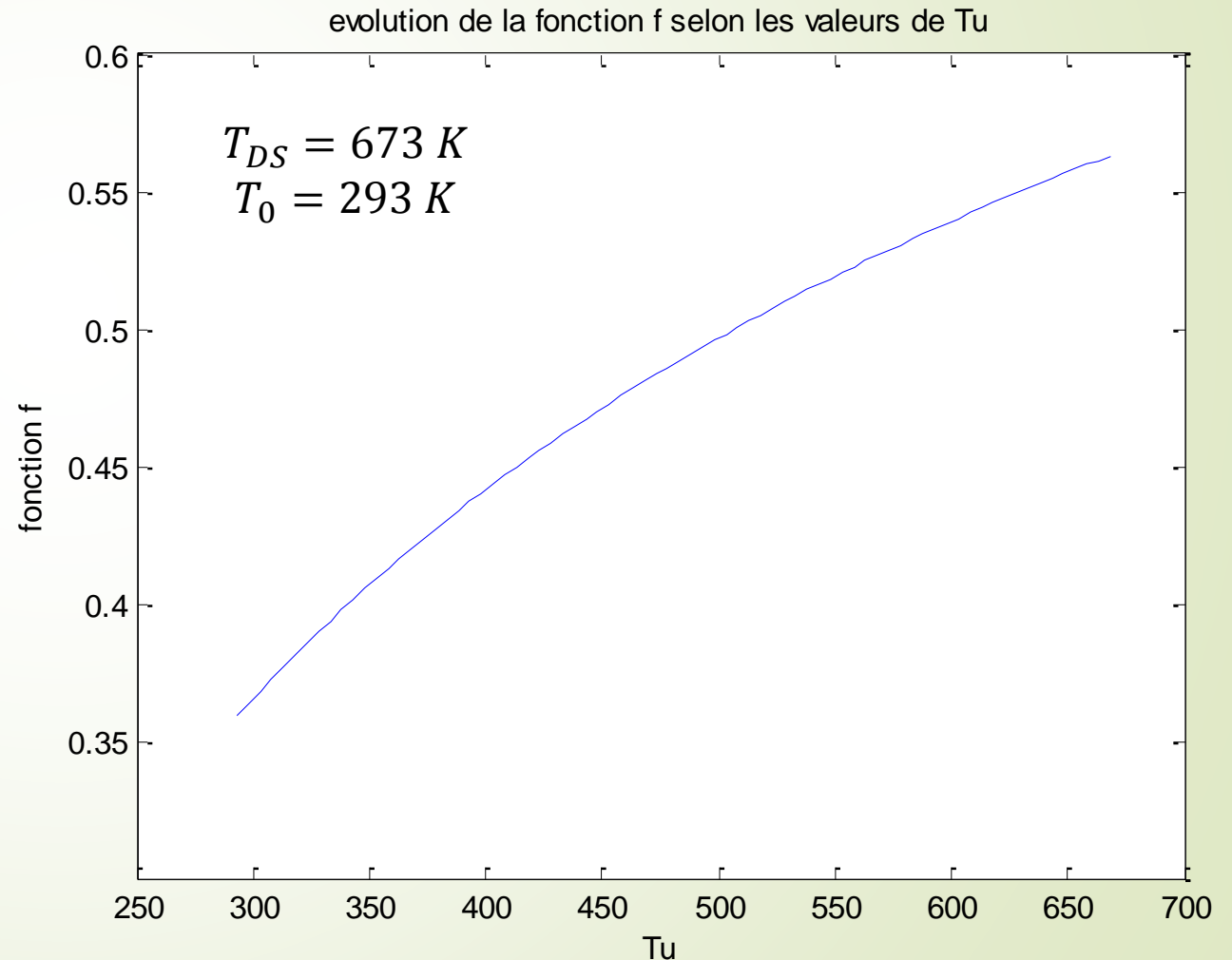
III Valorisation multiples effets

III.3 Cycle ORC à l'amont de HEX utile

III.3.a En chaleur latente

► Analyse économique :

$$\frac{v_{Qu}}{v_w} > 1 - \frac{T_0}{T_{DS} - T_u} \ln \left(\frac{T_{DS}}{T_u} \right) = f$$



III Valorisation multiples effets

III.3 Cycle ORC à l'amont de HEX utile

III.3.b En chaleur sensible $T_0 < T_{ui} < T_{u0} < T_{DS}$

- Analyse énergétique :

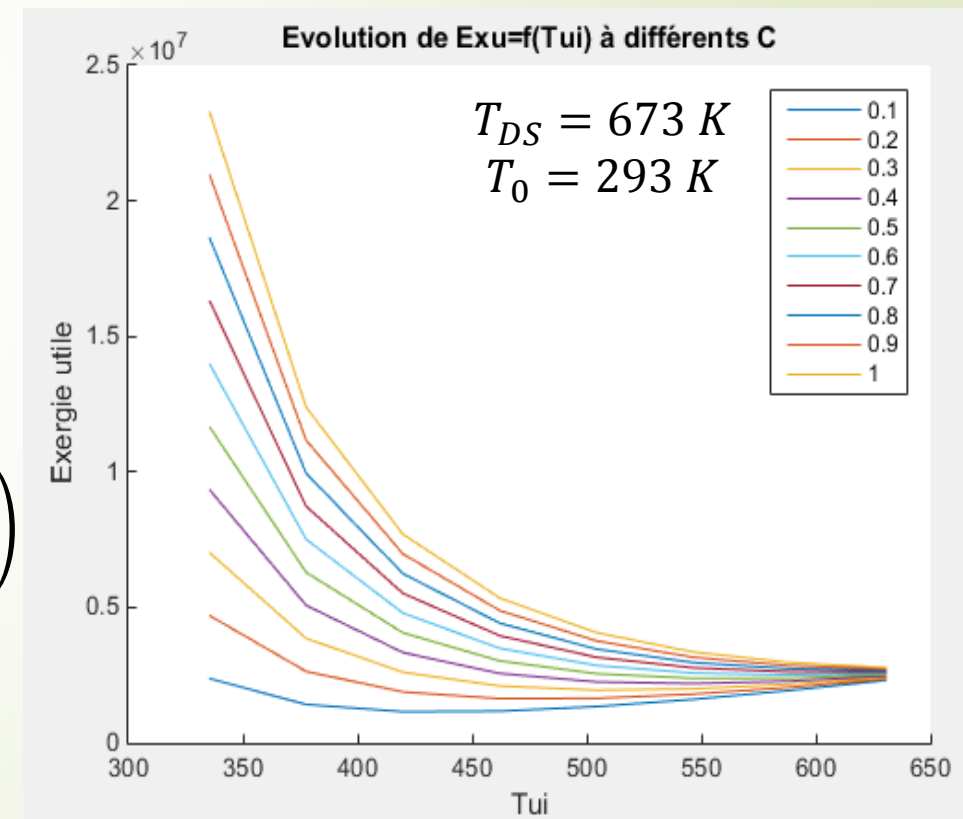
$$\dot{E}_u = \dot{c}_{DS} \left[(T_{DS} - T_0) - T_0 \ln \frac{T_{ui}}{T_0} \right]$$

Cas optimal : valorisation totalement mécanique

- Analyse exergétique (sur fluide récepteur) :

$$\dot{E}_{xu} = \dot{c}_{DS} (T_{DS} - T_{ui}) \left(1 - \frac{T_0}{\tilde{T}_{DS}} \right) + \dot{c}_{DS} (T_{ui} - T_0) \left(1 - \frac{T_0}{\tilde{T}_{uio}} \right)$$

$$\text{Avec } T_{u0} = \frac{\dot{c}_u}{\dot{c}_{DS}} (T_{DS} - T_{ui}) + T_{ui}$$



III Valorisation multiples effets

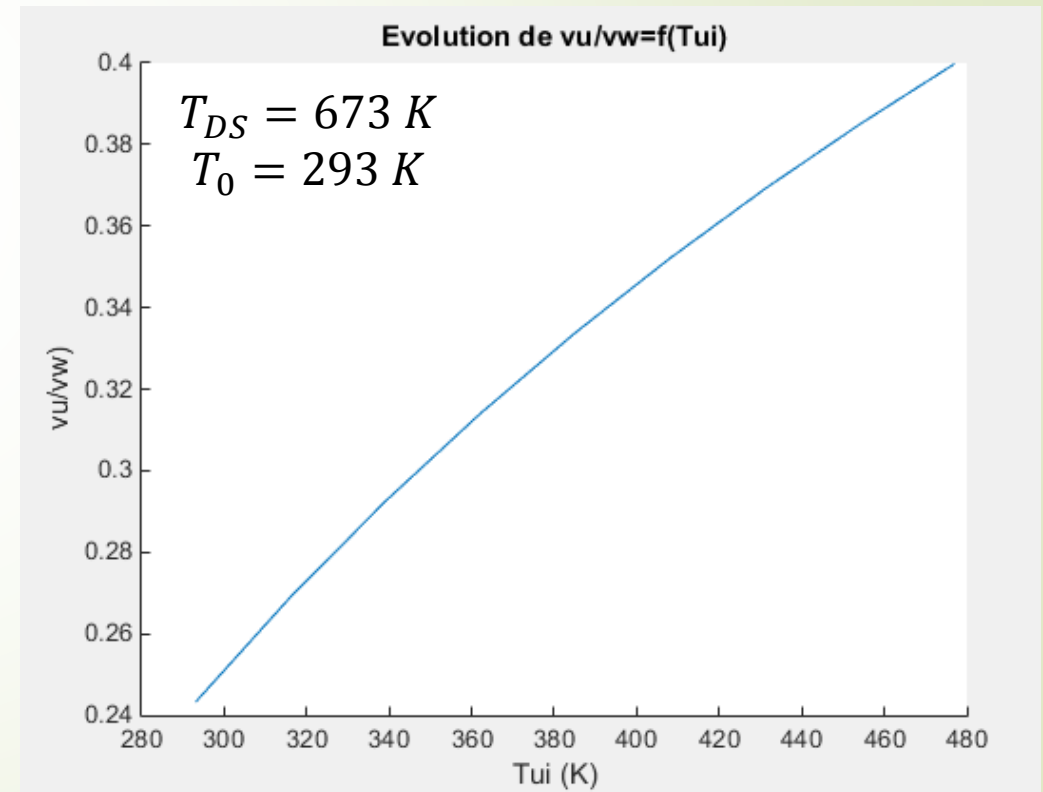
III.3 Cycle ORC à l'amont de HEX utile

III.3.b En chaleur sensible $T_0 < T_{ui} < T_{u0} < T_{DS}$

- Analyse économique (sur fluide émetteur):

$$v_u(T_{DS} - T_{ui}) + v_W(T_{ui} - T_0) \left(1 - \frac{T_0}{T_{ui}}\right) > \dot{V}_W$$

$$\frac{v_u}{v_W} > \frac{T_0}{T_{DS} - T_{ui}} \ln \frac{T_{ui}}{T_{DS}} + 1$$



IV Conclusion - Perspectives

- Valorisation de chaleur fatale : préoccupation actuelle
- Méthodologie d'approche selon 3 points de vue :
 - Energétique (classique)
 - Exergétique (physicien)
 - Economique (ingénieur)
- Nombreuses situations possibles dont :
 - Contraintes de site
 - Structures du système
- Intérêt des effets multiples
Dont valorisation mécanique (cogénération)

Remerciements aux étudiants pour leur travail et enthousiasme.

Références:

- ADEME – La chaleur fatale industrielle – Mars 2015
- M.FEIDT – How to compare various wasted heat valorization processes : an actual task – CIEM 2015
- M.FEIDT – Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés– Lavoisier Tic&Doc

Merci de votre aimable attention