



# Journée SFT 15 Juin 2023

## *Analyse Second Principe Multi-échelles de Systèmes Energétiques Complexes*

# Entropie, Exergie et Efficacité Energétique des Procédés, le tout (ou presque) en un Temps Fini et avec un fil rouge, celui des équations

Michel Pons

*LISN, Université Paris-Saclay, CNRS*

Rue du Belvédère, bât 507, Campus, 91400 Orsay

<https://perso.limsi.fr/mpons/>



Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique



**UN IMMENSE MERCI**  
**A FLORINE, JULIEN ET MAXIME**  
**POUR M'AVOIR INVITE À FAIRE**  
**ENCORE UN "TOUR DE PISTE"**  
**SUR UN SUJET QUI ME PASSIONNE**

le fil rouge des équations

# L'entropie $s$

- Fonction d'état définie par sa différentielle :  $ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{1}{T} \left( du - \frac{p}{\rho^2} d\rho - \sum_k \mu_k dc_k \right)$ , donc ...
- Propriétés issues de énergie interne  $u$ , densité  $\rho$  et concentrations  $c_k$  (+  $\mu_k$ ,  $p$  et  $T$ ).
- L'équation de transport de  $s$  se déduit de celles de  $u$ ,  $\rho$  et  $c_k$  :  
Cf. Jou, Casas-Vasquez et Lebon, *Extended Irreversible Thermodynamics*, Springer (1996), pp. 4-23.
- Termes d'accumulation et d'advection  $\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla s$  -> **l'entropie fonction d'état  $s$** .
- **Flux diffusif d'entropie**  $\mathbf{J}_s^d = \frac{1}{T} \left[ \mathbf{q} - \sum_k \mu_k \cdot \mathbf{J}_k^d \right]$  : directement déduit des flux diffusifs de chaleur et de masse.
- **Terme source** :  $\dot{\sigma}''' = \mathbf{q} \cdot \nabla \left( \frac{1}{T} \right) - \frac{1}{T} \mathbf{P}^v : \nabla \mathbf{v} - \sum_k \mathbf{J}_k^d \cdot \nabla \left( \frac{\mu_k}{T} \right) + \frac{\rho}{T} \sum_l \mathcal{A}_l \dot{\xi}_l + \frac{1}{T} \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{i}$

## Le second principe :

- **Le terme source d'entropie ne peut pas être négatif, nulle part, jamais.**

$$\dot{\sigma}''' = \mathbf{q} \cdot \nabla \left( \frac{1}{T} \right) - \frac{1}{T} \mathbf{P}^v : \nabla \mathbf{v} - \sum_k \mathbf{J}_k^d \cdot \nabla \left( \frac{\mu_k}{T} \right) + \frac{\rho}{T} \sum_l \mathcal{A}_l \dot{\xi}_l + \frac{1}{T} \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{i}$$

**Diffusion de chaleur**  
dans un champ de température non-uniforme

**Friction** (visqueuse)  
dans un champ de vitesse non-uniforme

**Diffusion de masse**  
dans un champ de 'concentration' non-uniforme

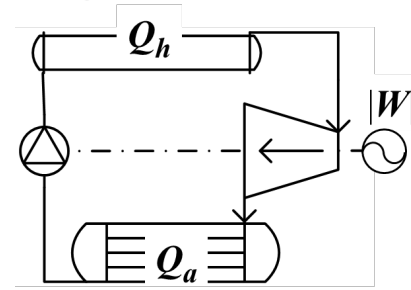
**Réactions chimiques**  
ayant lieu à vitesse non-nulle

**Effet Joule**

Cinq termes de **production d'entropie**, c.à.d. **d'irréversibilité** ...

- **... avec entre eux, trois opérations :**
  - 1) **l'addition** entre les causes d'irréversibilité,
  - 2) **l'addition** (intégration) sur le volume et
  - 3) **l'addition** (intégration) sur le temps.

# Efficacité énergétique des procédés de conversion d'énergie (1)



- Exemple topique, le **moteur ditherme stationnaire** : Conversion de chaleur à haute température  $T_h$ ,  $Q_h$ , en travail mécanique  $|W|$  avec échanges avec l'air extérieur à  $T_a$ .
- La combinaison [*bilan Premier Principe*] –  $T_a \times$  [*bilan Second Principe*] ...
  - 1° : fait émerger le bilan de la quantité [*Energie totale*] –  $T_a \times$  [*Entropie*] ...
  - 2° : conduit à l'**expression du rendement du moteur  $\eta$**  (défini comme  $|E_{utile} / E_{motrice}|$ )

- Le rendement s'écrit : 
$$\eta = \frac{|W|}{Q_h} = \left(1 - \frac{T_a}{T_h}\right) - \frac{T_a \cdot \sigma_{TOT}}{Q_h}$$

Rendement  $\eta_{rev}$  ↑  
 d'un **cycle réversible**  
 assurant la même fonction  
 ('rendement de Carnot')

Production d'entropie **TOTALE**

# Efficacité énergétique des procédés de conversion d'énergie (2)

- Mettre  $\eta_{rev}$  en facteur fait apparaître une production d'entropie 'de référence' (qui s'avère aussi être la borne maximale)

$$\sigma_{ref} \rightarrow \eta = \eta_{rev} \cdot \left[ 1 - \frac{\sigma_{TOT}}{Q_h \cdot (T_a^{-1} - T_h^{-1})} \right]$$

• Pour tout procédé **stationnaire** de conversion d'**une** énergie 'motrice' en **une** autre forme d'énergie, 'utile' et souhaitable,

- *travail,*
- *froid,*
- *chaleur échangée avec une source autre que l'air extérieur,*
- *chaleur autre que la source 'motrice',*
- *voire énergie solaire, ...*
- *travail, ...*

(p. ex. pompe à chaleur à compression, climatisation à absorption ...)

la combinaison [1<sup>er</sup>- $T_a$ ×2<sup>nd</sup>] permet d'exprimer le rendement sous la forme :

$$\eta = |E_{utile} / E_{motrice}| = \eta_{rev} \cdot \left[ 1 - \sigma_{TOT} / \sigma_{ref} \right]$$

# Une équation très simple et très familière ...

$$\eta = \eta_{rev} \cdot \left[ 1 - \sigma_{TOT} / \sigma_{ref} \right]$$

- Ou bien :  $\eta / \eta_{rev} = 1 - \sigma_{TOT} / \sigma_{ref}$  ou encore :  $\eta / \eta_{rev} + \sigma_{TOT} / \sigma_{ref} = 1$

... et dont la « lecture » permet d'**explorer diverses (6) pistes**,  
indépendantes en apparence,  
toutes riches en enseignements,  
d'abord par elles-mêmes,  
mais encore plus lorsqu'elles s'entrecroisent.

# Piste No 1 : C'est une égalité, et elle DOIT être satisfaite

$$\eta/\eta_{rev} = 1 - \sigma_{TOT} / \sigma_{ref}$$

- Ce BILAN sur les productions d'entropie où chacun des termes peut être calculé indépendamment DOIT être 'bouclé'.
- Vérifier ce point permet souvent de déceler des erreurs (*expérience vécue il y a encore un mois seulement*)



## Piste No 2 : Définition de l'exergie

- La combinaison : [*bilan Premier Principe*] –  $T_a \times$  [*bilan Second Principe*] fait émerger  
**la combinaison** [*Energie totale*] –  $T_a \times$  [*Entropie*].

- **C'est la définition de l'exergie** (notée  $b$ ), par sa différentielle :  $db = de_{tot} - T_a \cdot ds$  .
  - *Travail maximal produit - cycles réversibles - nulle pour échanges avec l'ambiante à  $T_a$ .*

- [*Bilan 1er Principe*] –  $T_a \times$  [*Bilan 2nd Principe*]  $\rightarrow$  [*Bilan d'exergie*]  $B_{utile} = B_{motrice} - \beta_{TOT}, \dots$

où les irréversibilités sont représentées par des PERTES D'EXERGIE  $\beta$ , selon  $\dot{\beta}''' = T_a \cdot \dot{\sigma}'''$ , qui ont donc toutes les propriétés des productions d'entropie.

- S'en déduit le **rendement exergetique du procédé** :  $\frac{B_{utile}}{B_{motrice}} = 1 - \frac{\beta_{TOT}}{B_{motrice}}$  .

## Définition de l'exergie (2)

- **Ces deux approches** (par l'entropie / par l'exergie)

donnent deux équations, qui sont absolument égales et équivalentes :

$$0 \leq \frac{\eta}{\eta_{rev}} = 1 - \frac{\sigma_{TOT}}{\sigma_{ref}} = \frac{B_{utile}}{B_{motrice}} = 1 - \frac{\beta_{TOT}}{B_{motrice}} < 1$$

*Rendement  
Second Principe*                      *Rendement  
Exergétique*

- **Ces deux approches doivent toujours donner les mêmes résultats, quantitativement ET qualitativement** (*il n'y a qu'UN SEUL Second Principe*).
- Mettre en œuvre les deux approches apporte, au minimum une vérification, et souvent une meilleure compréhension du procédé.
- Boussole personnelle : utiliser des notions, propriétés, outils, etc. commun(e)s aux deux approches.

- On a vu que, pour la conversion **stationnaire** d'une énergie motrice en **une** énergie utile, la **définition intuitive du rendement** et la combinaison  $([E_{tot}] - T_a \times [S])$  donne 1° le rendement 'réversible' et 2° les rendements ci-contre, 'second principe' et 'exergétique', où tous les termes sont connus : - - ->

$$\eta / \eta_{rev} = 1 - \sigma_{TOT} / \sigma_{ref} = \\ = B_{utile} / B_{mot.} = 1 - \beta_{TOT} / B_{mot.}$$

## Piste No 3 : Analyser les systèmes dits *complexes*

- **Trois types de complexité :**
  - **3a : Systèmes instationnaires** (mais périodiques)
  - **3b : Systèmes pour cogénération**
  - **3c : Systèmes 'hybrides'**

### 3a : Systèmes instationnaires (procédés périodiques)

- Le rendement met en jeu des **intégrales sur la période** :  $\bar{\eta} = \left| \oint \dot{E}_{utile}(t).dt / \oint \dot{E}_{motrice}(t).dt \right|$ .
  - Les bilans [*Premier -*] et [*Second Principes*] incluent les **termes instationnaires (inertie)** et sont combinés selon [*bilan Premier Principe*] –  $T_0 \times$  [*bilan Second Principe*], avec  $T_0 = Cste$ .  
(-> 1° exergie = fonction d'état, 2°  $\beta$  et  $\sigma$  toujours proportionnelles).
    - Il faut maintenant **compter avec les stockages** (inutiles en stationnaire).
      - Dans un procédé réversible, il faut des **stockages 'réversibles'**, c.à.d. à température stationnaire et avec des échanges à  $\Delta T$  nul et (si nécessaire) infiniment rapides (*masse infinie et surfaces échanges infinies, ce qui est cohérent avec la notion de cycle de Carnot*).
        - **Pour maximiser l'efficacité il faut imaginer le stockage 'réversible' (ou les) qui conduit AU procédé instationnaire réversible (de rendement  $\eta_{rev}$ ).**
- Avec stockage réel (ou absent), les équations mettent en évidence une 'irréversibilité' hors transfert réel, qui traduit le fait que le stockage réel n'est pas 'réversible'.

## 3b : Cogénération = produire deux énergies utiles (1)

- Par exemple : production stationnaire de travail  $|W|$  **ET** de froid  $Q_c$  à partir de chaleur  $Q_h$ .
- Combinaison  $[E_{tot}] - T_a \times [S]$  - - > bilan d'exergie :  $|W| + Q_c \cdot (T_a/T_c - 1) = Q_h \cdot (1 - T_a/T_h) - \beta_{TOT}$
- **Le rendement  $\eta$  n'est pas clairement défini, le rendement réversible  $\eta_{rev}$  non plus.**

- Pour définir **UN** rendement réversible  $\eta_{rev}$ ,

indépendant du fonctionnement de la machine (*uniquement fonction des sources*),  
définir le rendement  $\eta$  à partir d'une combinaison des énergies produites  
ne suffit pas.

- p.ex. avec :  $\eta = [s \cdot |W| + (1-s) \cdot Q_c] / Q_h$  :

$$\eta_{rev} = \frac{s \cdot |W| + (1-s) \cdot Q_c}{Q_h} \Bigg|_{\beta=0} = s \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_h}\right) + \left(1 - s \cdot \frac{T_a}{T_c}\right) \cdot \left(\frac{Q_c}{Q_h}\right)$$

## 3b : Cogénération = produire deux énergies utiles (2)

- Produire une énergie utile supplémentaire introduit un degré de liberté supplémentaire.
- On a donc besoin d'une équation supplémentaire, autre que la définition du rendement.  
*Note : Dans la littérature de la cogénération, la définition du rendement est ... disons ... variable.*

- Cette équation supplémentaire, forcément imposée par l'extérieur,  
(la thermodynamique ne donne que deux équations)  
peut être une corrélation entre les flux d'énergie (le doit-elle ?).

- Par exemple, avec une relation du type  $Q_c = r \cdot |W|$ ,  
pour tout  $\eta = [s \cdot |W| + (1-s) \cdot Q_c] / Q_h$ , on peut écrire,  $\forall (s, r)$  :

$$\eta = \frac{s \cdot |W| + (1-s) \cdot Q_c}{Q_h} = \underbrace{\left[ \frac{(s+r-r \cdot s)(1-T_a/T_h)}{1+r \cdot (T_a/T_c-1)} \right]}_{\eta_{rev}} \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{TOT}}{\sigma_{ref}} \right)$$

## 3c : Systèmes hybrides (avec deux énergies motrices)

- Par exemple : production de travail  $|W|$  à partir de **2 sources de chaleur**  $Q_{h1}$  et  $Q_{h2}$ .
- Le bilan d'exergie ne définit clairement  $|W| = Q_{h1} \cdot (1 - T_a/T_{h1}) + Q_{h2} \cdot (1 - T_a/T_{h2}) - \beta_{TOT}$  ni le rendement ni le rendement réversible.
- Question 1 : une équation supplémentaire est-elle possible ? (contrainte sur les flux  $Q_{h1}$  et  $Q_{h2}$ ?)
- Question 2 : le procédé n'est-il pas instationnaire ? (les deux sources utilisées en alternance ?)
- Une des deux sources ne serait-elle pas considérée comme 'plus favorable' que l'autre ?
  - Il faudrait pouvoir définir le procédé réversible équivalent (avec une des deux sources comme référence ? Probablement avec un stockage 'réversible')  
l'utilisation de l'autre source dans le système réel devrait créer en soi une irréversibilité (même si cette irréversibilité ne correspond à aucun transfert réel).

# Enseignements de l'étude (rudimentaire) de procédés complexes

- La simple question « *Quel est le rendement réversible du procédé ?* » s'avère pertinente.
  - Elle peut révéler que le rendement est, en fait, mal défini, et elle pousse à imaginer le procédé limite réversible à efficacité maximale.

- Il faut **UN** rendement réversible  $\eta_{rev}$ ,

afin de pouvoir poser 
$$\frac{\eta}{\eta_{rev}} = \left[ 1 - \frac{\sigma_{TOT}}{\sigma_{ref}} \right],$$

et retrouver le cadre de l'analyse Second Principe.



## Piste No 4 : Il **FAUT** un rendement réversible $\eta_{rev}$

- **De nombreux procédés ne font pas de conversion d'énergie,** ils produisent une utilité qui ne s'exprime pas en termes de flux d'énergie, deux exemples très différents : l'habitat ; le raffinage du fuel (procédé chimique complexe).
  - Énergétiquement parlant, ces procédés ne sont que **dissipatifs**.
    - Comme aucun cycle réversible ne peut produire leur utilité, **aucun rendement réversible  $\eta_{rev}$**  ne peut leur être associé.
- L'efficacité d'un procédé dissipatif ne se traduit que par sa consommation énergétique, sur laquelle on peut agir directement.
  - **Le Premier Principe suffit** à les analyser et les optimiser, l'analyse Second Principe (toujours possible) n'est pas indispensable.

# Piste No 4 (2) : Un exemple de procédé dissipatif (sans $\eta_{rev}$ )

- Intégration énergétique dans procédé de raffinage : efficacité énergétique améliorée par réorganisation des échanges de chaleur internes (ci-dessous : de **1** vers **2**).

- L'analyse et l'amélioration des **courbes composites** ne reposent que sur des

considérations en termes de transferts de chaleur, et donc **d'énergie**.

- À part assurer que la chaleur va bien du chaud vers le froid, il n'est pas fait appel au Second Principe. (pas de minimisation des irréversibilités)

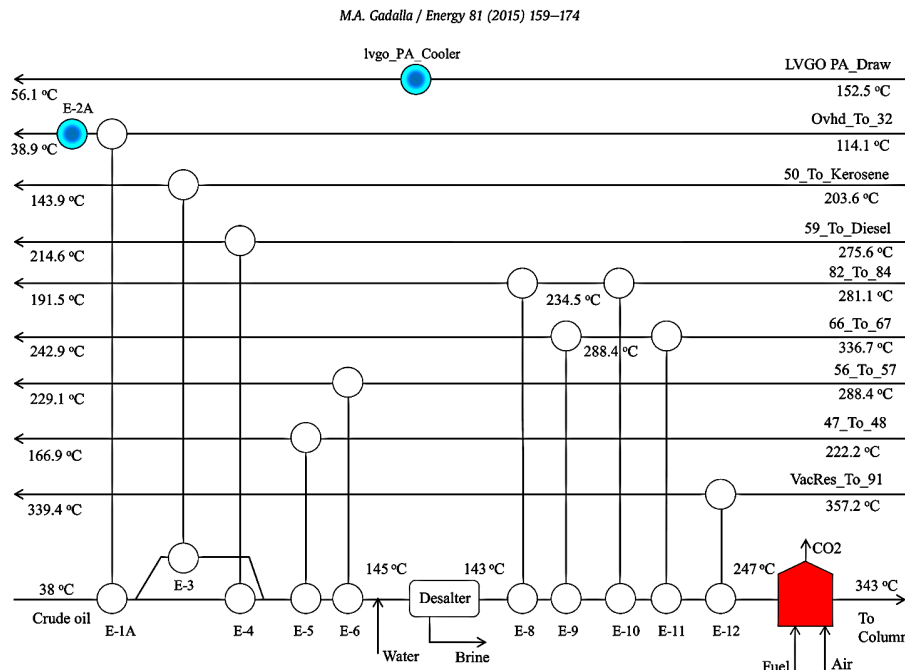
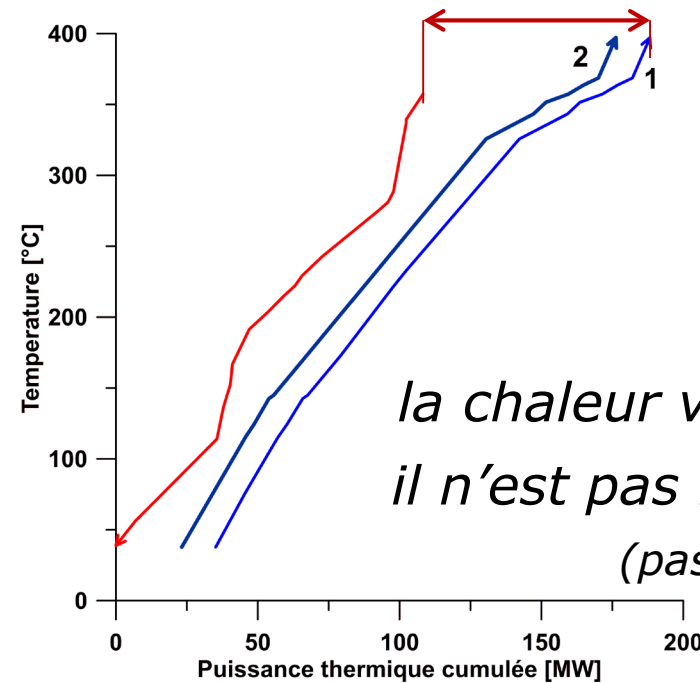


Fig. 15. An existing HEN, including side for crude oil feed from well to distillation columns.



## Piste No 5 :

Pour l'efficacité énergétique d'une conversion d'énergie,  
c'est l'**irréversibilité TOTALE** qui compte

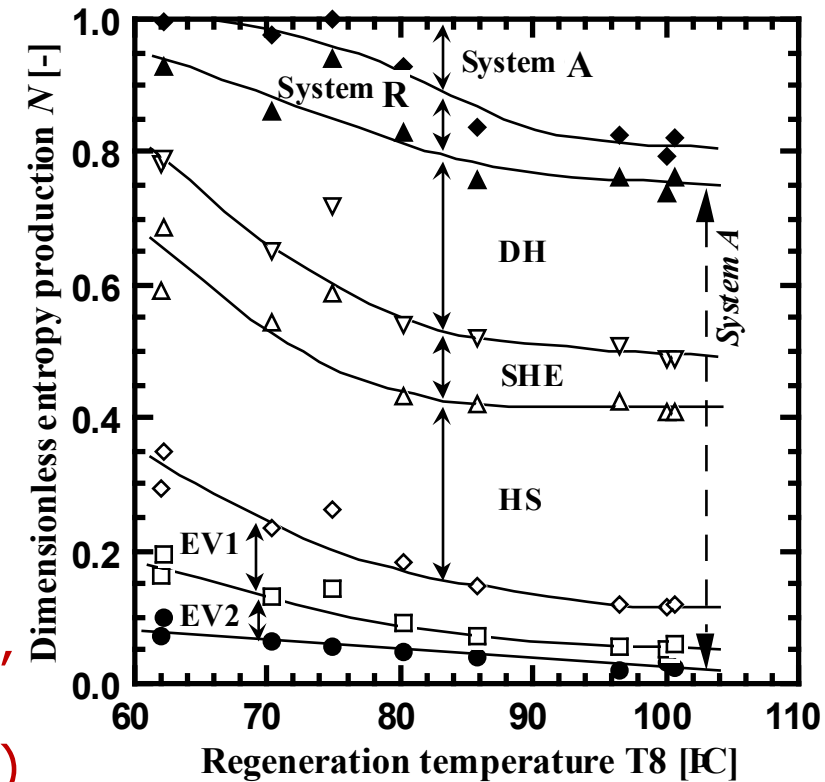
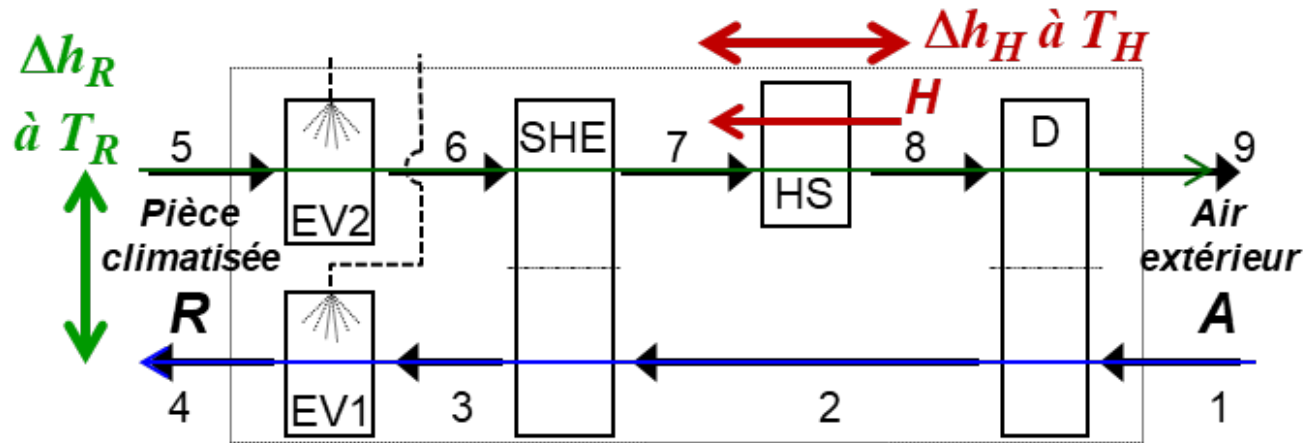
$$\frac{\eta}{\eta_{rev}} = 1 - \frac{\sigma_{TOT}}{\sigma_{ref}} = \frac{B_{utile}}{B_{mot}} = 1 - \frac{\beta_{TOT}}{B_{mot}}$$

- Analyser un procédé, c'est le **considérer dans sa globalité**,  
(*bien plus que composant par composant*)  
**avec TOUTES les causes d'irréversibilité**  
**intégrées sur le volume et sur le temps.**

# BILAN de production d'entropie TOTALE

$$\eta/\eta_{rev} + \sigma_{TOT}/\sigma_{ref} = 1 \quad .$$

- P. ex. : les mélanges de flux d'air des cycles frigorifiques (ouverts) à roue dessiccante



Kodama et al., *Int J Energy Res* (2000)

- Deux processus de mélange :

**R** : air soufflé froid et 'sec' ; **A** : air rejeté chaud et 'humide'

- Les irréversibilités de mélange (*A et R, hors de tout composant*) émergent d'elles-mêmes des équations de bilan Second Principe.

## C'est l'irréversibilité **TOTALE** qui compte (3)

$$\frac{\eta}{\eta_{rev}} = 1 - \frac{\sigma_{TOT}}{\sigma_{ref}} = \frac{B_{utile}}{B_{mot}} = 1 - \frac{\beta_{TOT}}{B_{mot}}$$

- Exemple de vision globale : **le contrôle.**
- Soit un procédé instationnaire auquel on ajoute un PC en vue d'y faire du contrôle.
  - *Énergétiquement parlant, un PC consomme pas mal d'électricité pour produire un peu de lumière et des signaux électriques très faibles : son rendement exergetique est quasi nul.*
- Mais les signaux produits peuvent piloter d'autres composants du procédé, y faire les actions adéquates aux bons moments, et ainsi réduire notablement les irréversibilités.
  - **Si cette dernière réduction d'irréversibilités est plus importante que l'irréversibilité apportée par le PC lui-même, alors le contrôle est bénéfique.**

## C'est l'irréversibilité **TOTALE** qui compte (4)

$$\eta = |E_{utile} / E_{motrice}| = \eta_{rev} \cdot [1 - \sigma_{TOT} / \sigma_{ref}]$$

L'irréversibilité **TOTALE** (*production d'entropie, perte d'exergie*) est la **seule** grandeur qui explique l'écart entre  $\eta_{rev}$  et le rendement réel  $\eta$ .

- Les efficacités ou rendements de composant n'y parviennent pas (ni efficacités basées sur le '1<sup>er</sup> Principe' ni rendements 'exergétiques').
  - La production d'entropie, la perte d'exergie, quantifie l'influence d'un phénomène local sur l'efficacité globale du procédé.
  - L'analyse Second Principe est donc LE cadre qui permet de penser l'optimisation énergétique des procédés de conversion.

# Piste No 6 : **OPTIMISER** avec l'irréversibilité **TOTALE**

- **Optimiser** = trouver le 'design' qui minimise l'irréversibilité totale

(Un 'design' = Un ensemble  $\{Z_k\}$  de tous les paramètres de dimensionnement)

en envisageant toutes les configurations possibles,

et **sous des contraintes explicitées.**

- **Il y a deux types de paramètres :**

- **les paramètres continus** (ou quasi-continus : diamètres de tuyauterie, surfaces d'échange ...)
- **les paramètres discrets** (simple-effet ou double-effet ; tel ou tel fluide ; avec ou sans échangeur de récup. de chaleur ...).

# Pour **optimiser**, il faut deux étapes ...

... chacune résolvant un problème :

**Étape 1 : A puissance *utile* donnée et à '*investissement*'  $I_0$  donné, quel est le '*design*' qui minimise l'*irréversibilité totale* ?**

-> pour chaque configuration *discrète* possible, optimiser les dimensions *continues*, puis choisir la configuration la plus efficace.

**Étape 2 : A puissance *utile* donnée, quelle est la valeur de  $I_0$  '*la plus rentable*' ?**

- Note :  $I_0$  peut être en €, en Mégajoules, en énergie grise (cf. les ACV).



# Étape d'optimisation No 1 : dimensionnement optimal à puissance utile et investissement $I_0$ donnés

- **Méthode variationnelle** avec Lagrangien défini comme :  $\beta_{TOT} - \lambda.(I - I_0)$
- dont la dérivée par rapport à chaque paramètre  $Z_k$  et à  $E_{utile}$  fixée  $\left(\frac{\partial\beta_{TOT}}{\partial Z_k}\right)_{E_{utile}} - \lambda.\left(\frac{\partial I}{\partial Z_k}\right)_{E_{utile}}$  doit être nulle.
- => L'irréversibilité est minimisée quand :  $\frac{(\partial\beta_{TOT}/\partial Z_k)_{E_{utile}}}{(\partial I/\partial Z_k)_{E_{utile}}} = \lambda$  ; où  $\lambda$  est unique, indépendant de  $k$ .
- **Machine optimisée**  $\Leftrightarrow$  tous les rapports :  $\frac{(\partial\beta_{TOT}/\partial Z_k)_{E_{utile}}}{(\partial I/\partial Z_k)_{E_{utile}}} = \frac{(\partial\beta_{TOT}/\partial Z_l)_{E_{utile}}}{(\partial I/\partial Z_l)_{E_{utile}}} \quad \forall k,l$  sont égaux entre eux dans la configuration 'discrète' qui donne la plus faible irréversibilité totale.
  - En augmentant de  $\delta I$  l'investissement sur un paramètre de dimensionnement  $Z_k$ , la perte d'exergie totale diminue de  $\delta\beta_{TOT}^{(k)}$  : il y a un gain en rendement.
- Le 'design' est optimal quand le gain est indépendant du paramètre sur lequel on agit.

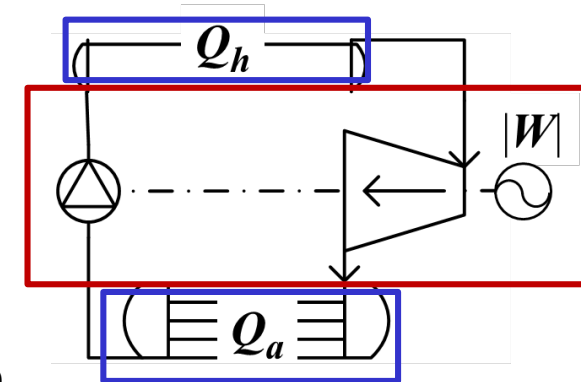
# Étape d'optimisation No 2 : investissement optimal à puissance utile donnée

- Considérons maintenant le 'coût' total du procédé :  $I_0 + F$  (investissement + fonctionnement).
- Le coût de fonctionnement  $F = \int_{vie} \frac{f \cdot \dot{E}_{utile}}{\eta} \cdot dt = f \cdot E_{utile} / \bar{\eta}$  (où  $\bar{\eta}$  est intégrée correctement),  
 dépend de l'irréversibilité totale du procédé selon :  $F = \left( \frac{f \cdot \dot{E}_{utile}}{\eta_{rev}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\overline{\sigma_{TOT}}}{\sigma_{ref}} \right)^{-1}$  (idem pour  $\overline{\sigma_{TOT}}$ )
- Investissement  $I_0$  optimal  $\Leftrightarrow$  coût total minimal,  
 soit  $dI_0 + K \cdot d\overline{\sigma_{TOT}} = 0$  avec  $K > 0$ .
- **Tant que la diminution du coût de fonctionnement  $F$  (obtenue via la diminution de  $\overline{\sigma_{TOT}}$ ) est plus forte que l'augmentation de l'investissement  $I_0$ , il est rentable d'investir plus ( $I_0 \nearrow$ ).**
  - **L'égalité donne l'investissement optimal.**

# Pour finir : un point de vue sur la Thermodynamique en Temps Fini

aussi nommée, à juste titre, Thermodynamique en Dimensions Finies

- Procédé topique : moteur ditherme fait d'un **cycle endo-réversible** échangeant avec ses sources à travers **deux échangeurs de dimensions finies**.

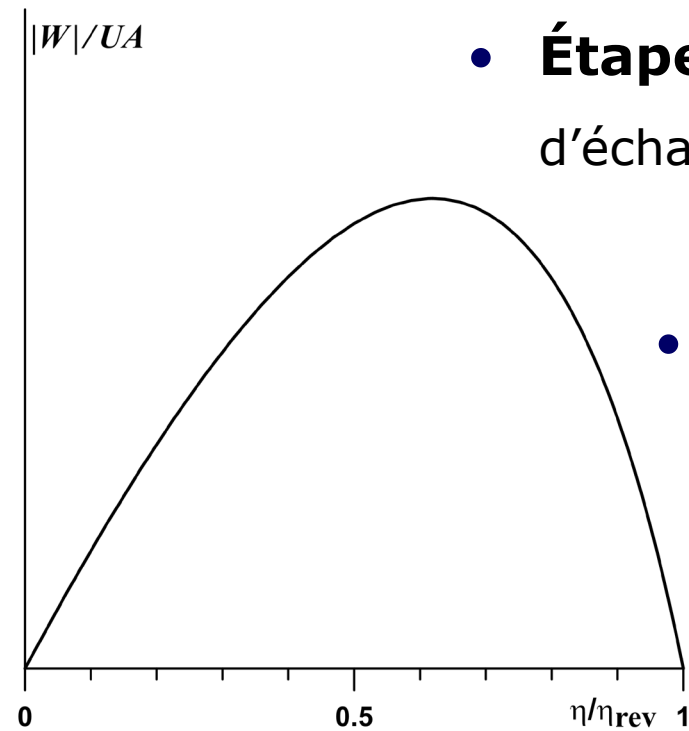


- **Étape No 1** : optimisation de la répartition de la surface d'échange entre les deux échangeurs  $h$  et  $a$ , sous contrainte donnée. **OK.**

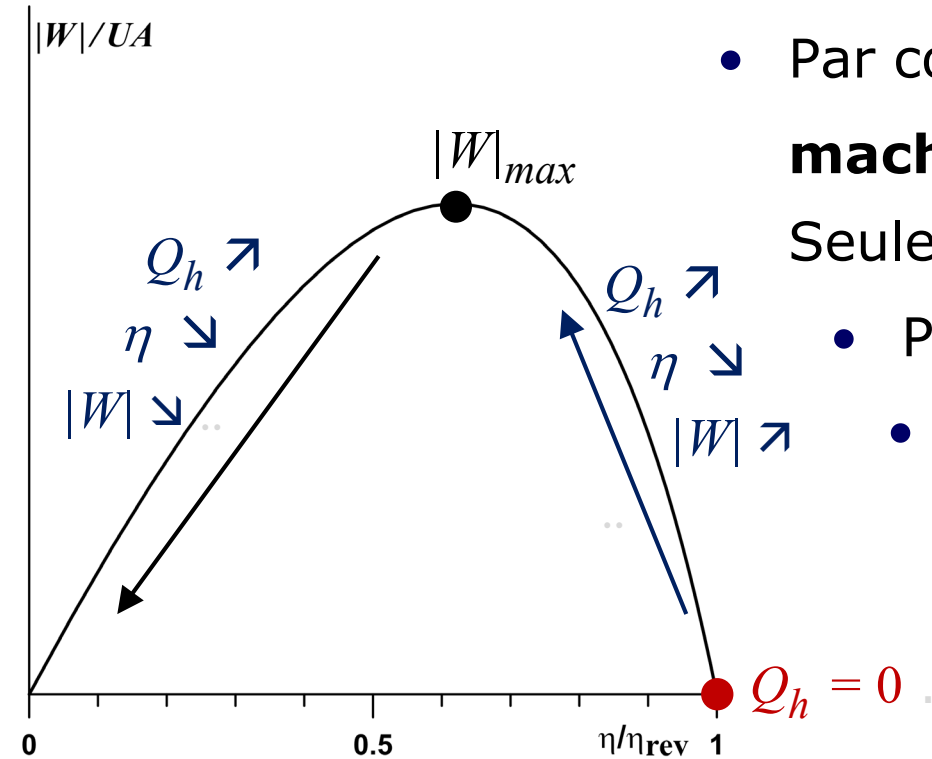
Par exemple, pour  $UA_h + UA_a = UA$  donné :  $UA_h = UA_a$ .

- **Puis, le graphe  $[|W|/UA$  vs.  $\eta/\eta_{rev}$ ] est établi,** (soit  $|W|$  à  $UA$  total donné).
- La courbe affiche un maximum remarquable.

- Mais, qu'en dire ?



# Thermodynamique en Temps Fini (2)



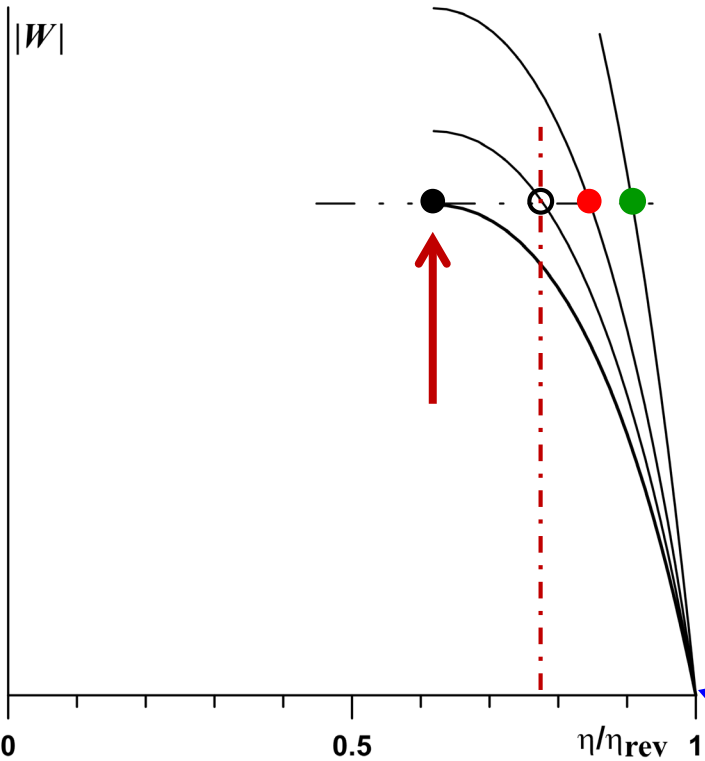
- Par construction, cette courbe décrit la **performance d'une machine donnée** (de taille finie) **quand** le flux  $Q_h$  **varie**.

Seule la répartition des échangeurs a été optimisée (étape 1).

- Pour  $Q_h = 0$ , le rendement est maximal  $\eta = \eta_{rev}$ . OK
- Puis, quand  $Q_h$  augmente, le rendement diminue mais le travail produit  $|W|$  augmente ... OK
- ... jusqu'à atteindre un maximum du travail produit  $|W|$  ce qui n'est pas étonnant (machine de taille donnée) OK

- Au-delà, quand  $Q_h$  augmente, le travail produit  $|W|$  diminue ... jusqu'à s'annuler.
  - De toute évidence, il n'y a aucun intérêt à fonctionner sur la partie gauche de la courbe.

# Thermodynamique en Temps Fini (3)



- Peut-être, faudrait-il présenter ce graphe différemment.
- L'étape 2 d'optimisation se fait sous la contrainte ' $|W|$  donnée' et l'investissement  $UA$  optimal minimise le coût TOTAL  $t$ .

$$t = i.UA + f.(|W|/\eta)$$

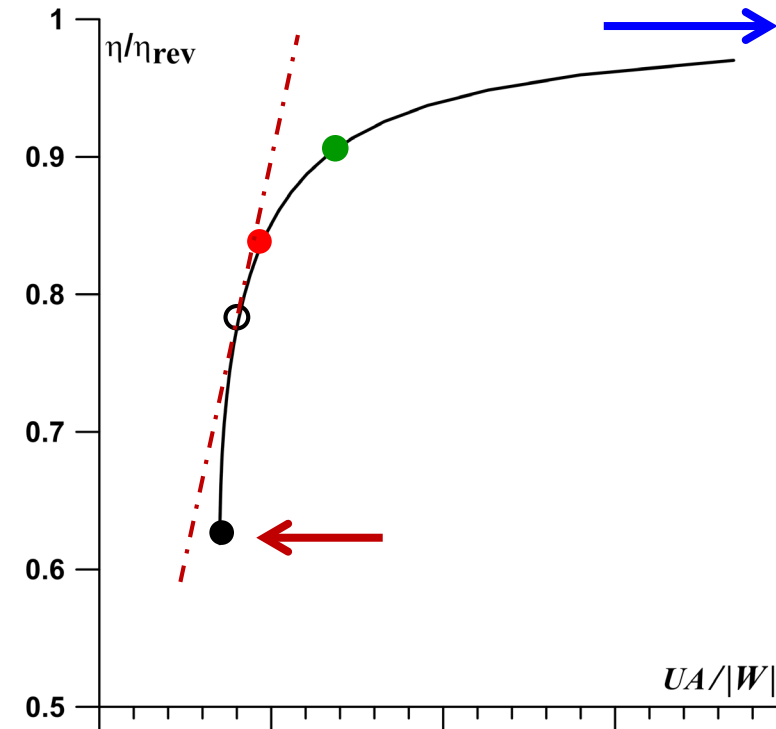
$$d\eta/d(UA/|W|) = i.\eta^2/f > 0$$

- L'optimum s'exprime dans le graphe  $\eta$  vs.  $UA/|W|$  - - - ->
  - Pente à l'optimum  $i.\eta^2/f$ , strictement positive, avec ...

Pour  $i \rightarrow 0$  (investissement 'gratuit'),  $\eta \rightarrow \eta_{rev}$  ;

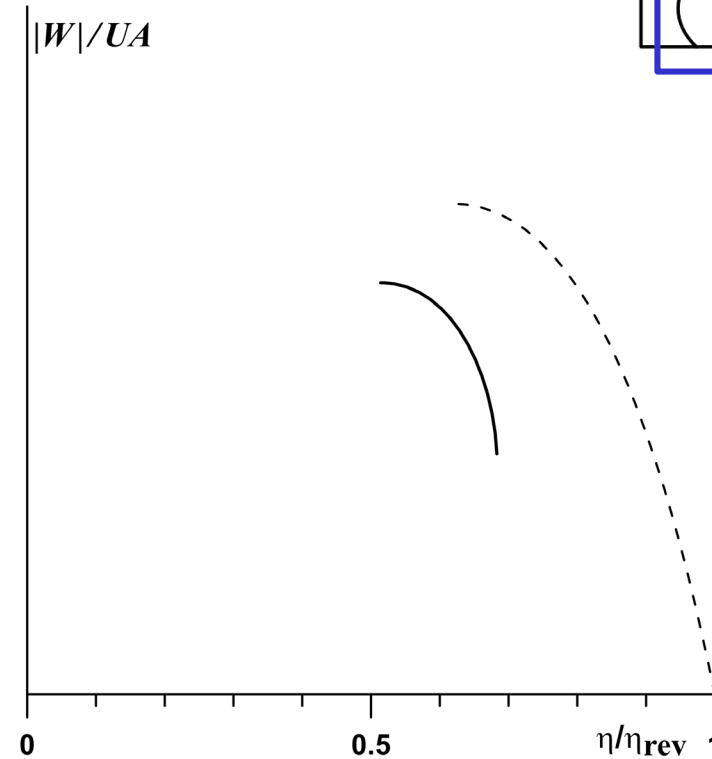
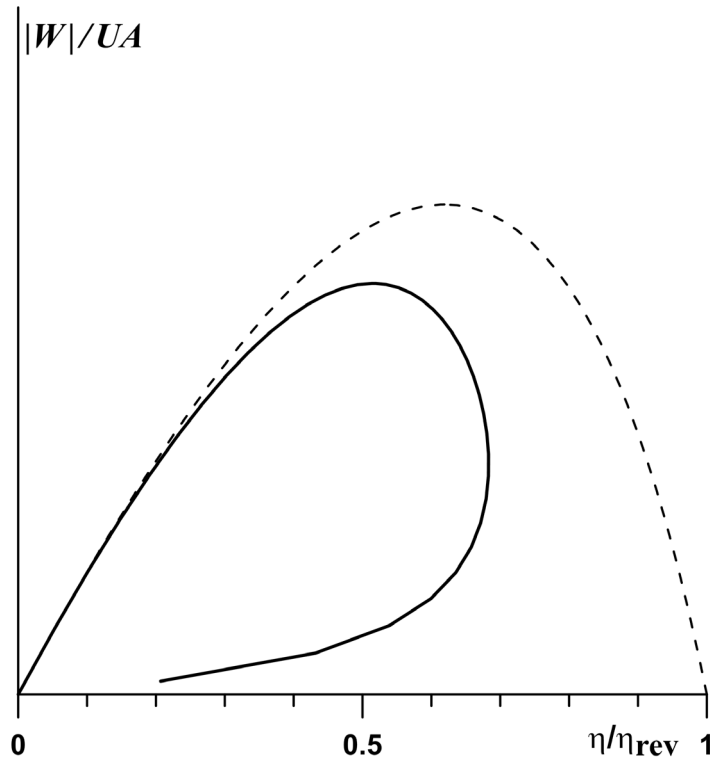
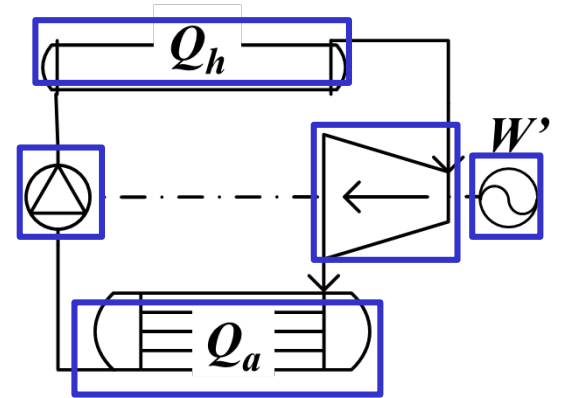
Pour  $f \rightarrow 0$  (fonctionnement 'gratuit'),  $\eta \rightarrow \eta(|W|_{max})$  : point ● .

Le cas 'normal' est sur la partie droite de courbe  $|W|$  vs.  $\eta$ .



# Et si on introduit des irréversibilités internes au cycle ...

... les courbes ( $W$  vs.  $\eta$ )  
 (obtenues avec une étape 1 incomplète)  
 deviennent :



# Conclusions

- **L'irréversibilité totale** (*production d'entropie ou perte d'exergie, c'est pareil*) est **LA** notion qui ...
  - ... fait le **lien** entre chaque phénomène **local** et la performance **globale** ...
  - ... explique l'écart entre l'**efficacité réelle** et sa borne maximale 'réversible' ...
  - ... permet de **penser l'optimisation** énergétique des procédés de conversion.
- **Penser LE procédé réversible** à efficacité maximale (y compris en lui associant des stockages 'réversibles') permet d'envisager tous les moyens possibles d'augmenter l'efficacité énergétique du procédé réel et de les comparer.
- Optimiser l'efficacité demande d'**aller 'plus loin' que la simple description** du fonctionnement (TTF), ce qui nécessite aussi une définition pertinente de cette efficacité.

**MERCI A VOUS TOUTES ET A VOUS TOUS**

**POUR VOTRE ATTENTION**

**ET POUR VOS QUESTIONS**