

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

ANALYSE EXERGÉTIQUE ET SOURCES RÉELLES - LE CAS DE LA CLIMATISATION SOLAIRE

M. Pons
CNRS-LIMSI, BP 133, 91403 Orsay Cedex
Michel.pons@limsi.fr

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008

Cadre de recherches : ORASOL

- ORASOL = Projet ANR – PREBAT 2007-2009
Optimisation de systèmes de **R**afraîchissement **S**olaire
- But = Comparer en termes de 1^{er} et 2nd principes différentes installations expérimentales de climatisation / rafraîchissement solaire :
LiBr+Eau, BaCl₂+NH₃, Dessiccant Gel de silice.
Perpignan, Pau, Chambéry, La Rochelle, St-Pierre-de-la-Réunion.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008

Variabilité des sources

- Le flux solaire et la température de l'air extérieur (source ext.) varient.
- Thermodynamique en environnement réel (en Énergie Solaire)

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008

Une donnée essentielle

- Les variations de flux (alternance jour/nuit),
- les variations de climat (à l'échelle hebdomadaire, et bien-sûr les saisons)
- et les variations de température extérieure (cycle quotidien, cycle annuel)
sont l'essence même de notre cadre de vie.
- C'est dans ce cadre que le rafraîchissement solaire prend tout son sens (exemple de la ventilation nocturne).

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008

Deux parties à l'exposé

- I/ En amont :
le soleil comme source d'énergie
- II/ En aval :
les variations de la température extérieure

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008

Partie I : le soleil comme source d'énergie

- Entre le soleil (source radiative) et l'effet produit par le procédé solaire, il y a ...
 - l'atmosphère,
 - et le procédé.
- Il est très important de savoir **distinguer les pertes d'exergie** dues à l'**atmosphère** et celles dues **au procédé**, en particulier s'il s'agit de comparer des procédés différents dans des climats différents (projet ORASOL).

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008

Entropie radiative

- Pour un corps gris à la température T , on a :
 - densité de flux d'énergie $i = \epsilon \sigma T^4$,
 - et densité de flux d'entropie $j = X(\epsilon)(4/3)(i/T)$.
[M. Planck, Theory of Heat Radiation, 1914].

avec : $1 \leq X(\epsilon)$.
- Il s'en déduit pour le flux solaire hors atmosphère (Soleil = corps noir à $T_s = 5770$ K)
 - $b_s = i_s - T_0 j_s = 0,93 i_s$.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008 7/39

Le flux Solaire vu de la Terre

- **Distance Terre - Soleil** = 150 millions de kilomètres et **présence de l'Atmosphère** :
 - Dans l'angle solide solaire ($6,79 \cdot 10^{-5}$ sr), le « direct » est atténué par l'Atmosphère ($i_{dr} < 1360$ Wm⁻²).
 - Dans l'hémisphère (2π sr), le « diffus » est redistribué par l'Atmosphère ($i_{df} \ll \sigma T_s^4 = 6,3 \cdot 10^7$ Wm⁻²).
- **Ces deux pertes d'exergie ne sont pas dues au procédé.**

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008 8/39

Question : quelle surface de référence ?

- **Première réponse**, apparemment évidente, du moins dans le cas des capteurs plans : la **surface des capteurs**. Si étendue à concentration : surface des miroirs.
- Mais, en pensant à un **champ étendu de capteurs** (plans ou non) **en plusieurs rangées**, le problème des ombres portées, des passages de construction / maintenance conduit à une **autre réponse** : la **surface totale au sol** réservée pour le champ de capteurs (ou miroirs, éventuellement + tour).
- **Cette dernière est retenue dans la suite.**

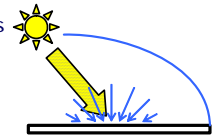
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008 9/39

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (1)

Une approximation simplificatrice et la méthode :

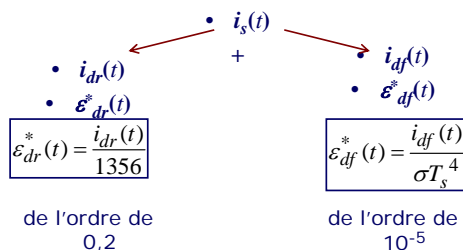
- La traversée de l'atmosphère ne modifie pas le spectre solaire ni ne polarise la lumière, elle ne fait que diminuer l'intensité du rayonnement.
- Les flux incidents direct et diffus sont traités séparément et de façon adéquate (l'additivité de l'entropie est assurée car les angles solides sont complémentaires).



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008 10/39

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (2a)

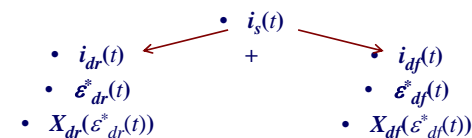


Pour le direct : tenir compte de l'angle d'incidence

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008 11/39

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (2b)



- La fonction $X(\epsilon^*)$ est obtenue intégrant le flux d'entropie monochromatique sur le spectre de longueurs d'onde [Landsberg & Tonge, *J. Phys. A*, 1979 ; Wright et al., *Int. J. Engng Sci.*, 2001].

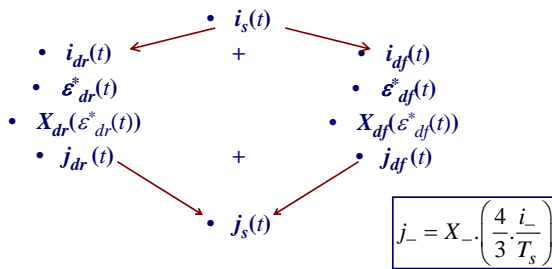
$$X_{dr}(\epsilon) \approx 0.973 - 0.275 \text{Ln} \epsilon + 0.0273 \epsilon$$

$$X_{df}(\epsilon) \approx 0.9659 - 0.2776 \text{Ln} \epsilon$$

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

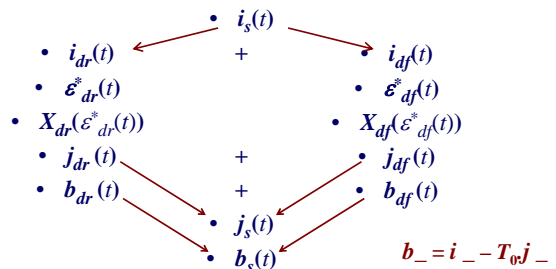
Journée SFT Exergie - ENSTA 20 mars 2008 12/39

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (2c)



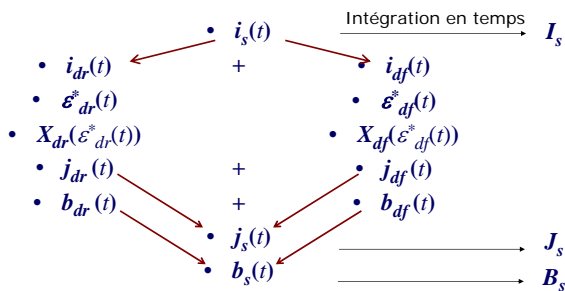
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (2d)



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (2e)



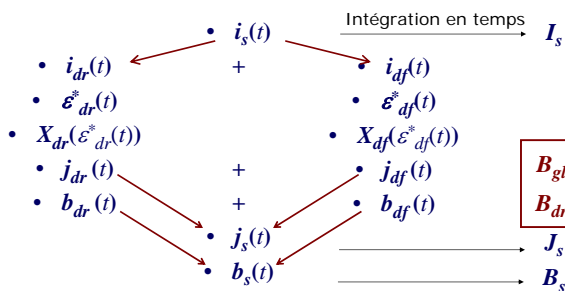
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Introduction de deux autres exergies :

- L'exergie « globale », b_{gl} , obtenue comme si tout le rayonnement solaire était diffus (cf. présentation d'octobre).
 - L'exergie « directe », b_{dr} , obtenue en ne prenant que la part directe du rayonnement solaire.
- C'est l'exergie accessible aux capteurs plans.**
- C'est l'exergie accessible aux capteurs à forte concentration.**

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Principe de l'évaluation de l'entropie liée au rayonnement solaire (2f)



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

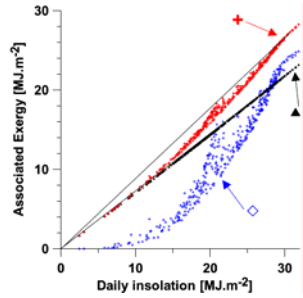
Données météo

- Pour l'instant, deux lieux :
 - Ouagadougou (tropical sec) Météonorm®
 - St-Pierre de la Réunion (tropical humide) **mesures LPBS**
 - **D'autres ??**
- Global et Diffus sur plan horizontal, toutes les 5 ou 10 minutes, et température ambiante (plus jour et heure TSV)
- T_0 = minimum observé de la température ambiante sur toute l'année.
- Intégration sur chaque jour : $i \rightarrow I$, et $b \rightarrow B$.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Résultats Ouagadougou (1)

- Ouagadougou :
- + : exergie solaire B_s ;
- ▲ : exergie globale B_{gl} ;
- ◇ : exergie directe B_{dr} .
- $0,72 \times I_s < B_s < 0,89 \times I_s$.
- $B_{gl} \approx 0,72 \times I_s$.
- $0 < B_{dr} < 0,8 \times I_s$.

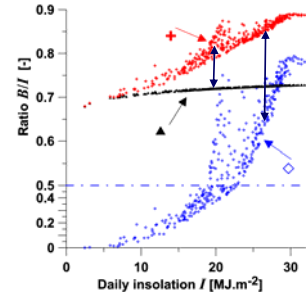


Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie - ENSTA
20 mars 2008
19/39

Résultats Ouagadougou (2)

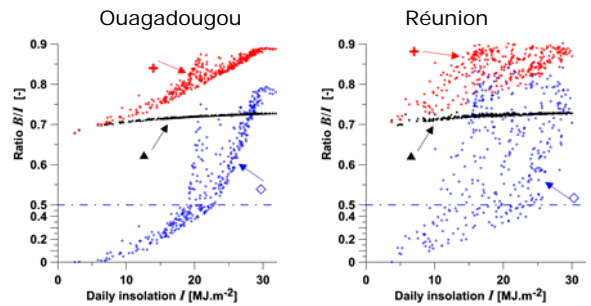
- Rapport B_{gl}/I_s :
(séparation échelle B/I)
- + : exergie solaire B_s ;
- ▲ : exergie globale B_{gl} ;
- ◇ : exergie directe B_{dr} .
- Signification thermodynamique des écarts.



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie - ENSTA
20 mars 2008
20/39

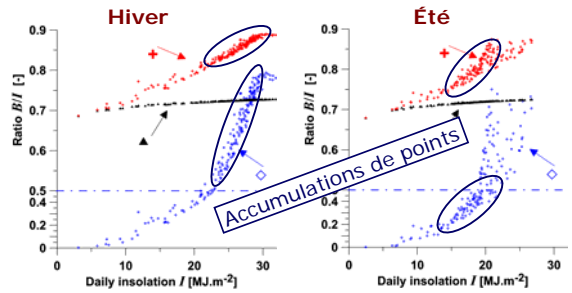
Comparaison Ouagadougou – Réunion



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie - ENSTA
20 mars 2008
21/39

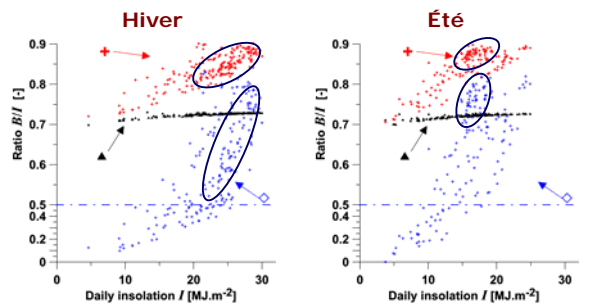
Signature du climat



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie - ENSTA
20 mars 2008
22/39

« Climat » Réunion



Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie - ENSTA
20 mars 2008
23/39

Moyenne sur toute l'année ...

des énergies et exergies journalières [MJ.m^{-2}]

Lieu	$\langle I_s \rangle$	$\langle B_s \rangle$	$\langle B_{gl} \rangle$	$\langle B_{dr} \rangle$
Ouaga_	21.9	18.3	15.8	12.6
Réunion	19.6	16.7	14.2	12.3

- Contrairement aux évaluations instantanées [Press, Nature, 1976], après intégration on a :
 $B_{gl} > B_{dr}$.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie - ENSTA
20 mars 2008
24/39

Trois conclusions pour Partie I

- Pour évaluer l'exergie du rayonnement solaire, **il FAUT les mesures sur le global ET le diffus.**
- Le choix même d'un **type de capteurs** induit une **perte d'exergie** (systémique).
- Une « signature » du climat semble apparaître.

Partie II : les variations de la température extérieure

- **La température de l'air extérieur varie, c'est bien un constat.**
Comment en rendre compte thermodynamiquement ?

L'exergie est définie par

$$db = dh - T_0 ds \rightarrow b = (h - \underline{h}_0) - \underline{T}_0 (s - \underline{s}_0)$$
 où \underline{h}_0 et \underline{s}_0 sont h et s à T_0 .

Via T_0 (et h_0 et s_0), la fonction d'état exergie dépend aussi du lieu (différente des pôles à l'équateur). C'est cette adaptation au climat du lieu qui, pour certains, fait l'intérêt de l'exergie.

Position du problème (1)

$$db = dh - T_0 ds \rightarrow b = (h - \underline{h}_0) - \underline{T}_0 (s - \underline{s}_0)$$

- **a/ Température extérieure variable ?**
ou bien **Température de référence fixe ?**
 h_0, T_0 et s_0 peuvent-ils être **dépendants du temps** ou bien doivent-ils être **fixes** ?
- **b/ Si h_0, T_0 et s_0 fixes :**
Quelle référence choisir ?
- Ma réponse : a/ Référence fixe, b/ « la plus favorable » au procédé.

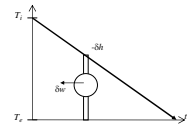
Exergie = Travail potentiellement produit ...

... par des cycles réversibles menant le système depuis son état initial jusqu'à l'équilibre thermodynamique avec l'air extérieur.

- $T_f = T_e$ (état final = équilibre thermo. avec l'air extérieur)

$$\Delta b = c_p [(T_e - T_i) - T_e \ln(T_e / T_i)]$$
- Le travail potentiellement produit par des cycles réversibles fonctionnant entre le système et l'air extérieur est

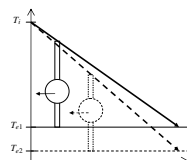
$$\Delta w = -\Delta b$$



Un kilo d'eau initialement à 100°C et refroidi jusqu'à la température extérieure

- Avec deux températures extérieures ...
... 40 et 20°C, et le kilo d'eau initialement à 100°C.

Cas	$T_f = T_e = T^*$	h_{initiale}	b_{initiale}
1	40°C	251 kJ	21.4 kJ
2	20°C	335 kJ	38.8 kJ

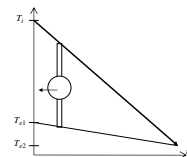


Avec h_0, T_0, s_0 variant comme la température extérieure ...

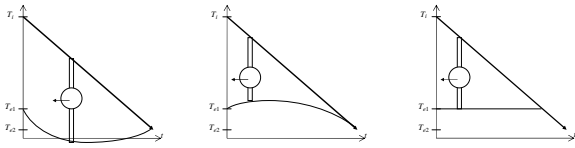
... de 40 à 20°C pendant que le kilo d'eau se refroidit.

- Le travail produit Δw dépend de l'évolution de la température extérieure (source froide des cycles Carnot) : égal ni à b_{i1} , ni à b_{i2} .
- Si évolutions linéaires de T et T_e ,

$$\Delta w = 28.5 \text{ kJ}$$
 (entre $b_{i1} = 21.4$ et $b_{i2} = 38.8$).



Autres évolutions de la température extérieure



- Le travail produit dépend de l'évolution suivie par T_{ext} (variations de la source froide).

Si h_0 , T_0 et s_0 sont fonctions de T_{ext} :

- L'exergie de l'air extérieur est certes toujours nulle,
- Mais ...
 - enthalpie, entropie et exergie ne sont plus des fonctions d'état ($\Delta X \neq X_f - X_i$, avec $X = h, s$ ou b) ;
 - les variations d'exergie ($b_f - b_i$) n'ont plus rien à voir avec le travail potentiellement produit par les cycles réversibles ...
- ... car ce travail dépend du chemin suivi par la température ambiante **pendant** le changement d'état considéré.

Donc ...

- La seule position thermodynamiquement tenable est que h_0 , T_0 et s_0 soient fixées.
 - Il apparaît alors que l'énoncé « l'exergie de l'air extérieur est nulle » n'est qu'une conséquence du cadre « académique » et qu'il ne résiste pas au passage aux problèmes réels.

Deuxième exemple

- Un kilojoule délivré à 100°C à un cycle de Carnot, avec une température extérieure qui oscille entre 20 et 40°C .
- La chaleur est délivrée lorsque $T_{ext} = 40^\circ\text{C}$.
- Si la chaleur est « turbinée » tout de suite, elle produit **160,9 J** [= $1000 \times (1 - 313/373)$].
- Si elle est **stockée puis turbinée quand $T_{ext} = 20^\circ\text{C}$** , elle produit **214,4 J** [= $1000 \times (1 - 293/373)$].

Élargissement du cadre thermodynamique

- Considérer les températures de source comme variables introduit la problématique du **stockage entre les sources et le procédé**. (notion toujours absente du cadre « académique » stationnaire avec sources à températures fixes).
- **Problématique du stockage présente dans presque tous les problèmes transitoires (problèmes réels), les systèmes solaires en particulier.**

Quelle référence choisir ?

- Guide pour répondre à cette question :
 - Que la référence permette de **définir un maximum de l'efficacité** (rendement exergetique égal à 1), **de la même façon que le $\text{COP}_{\text{Carnot}}$ maximise le COP** majorant correspondant au seul cas d'un processus réversible idéal.
- Que ce soit **une température de l'air extérieur**.

La référence choisie

- L'état de référence qui s'impose est celui qui **major**e l'exergie ainsi définie :

la température extérieure observée qui sur la période considérée soit la plus favorable au procédé étudié.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie -
ENSTA

20 mars 2008

37/39

Deux autres conclusions

- Pour mener une analyse exergétique lorsque la température extérieure varie, il faut tout de même **fixer UNE référence.**
- Un bon choix est la température observée la plus favorable sur la période considérée.

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie -
ENSTA

20 mars 2008

38/39

C'est fini

Merci de votre attention

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Journée SFT
Exergie -
ENSTA

20 mars 2008

39/39