

Exergie en environnement réel pour la climatisation solaire.

Michel PONS*

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (CNRS-LIMSI)

UPR3251, BP 133, 91403 Orsay Cedex

*(michel.pons@limsi.fr)

Résumé – Une méthode est donnée pour estimer l'exergie du flux solaire incident, soit en y distinguant les flux direct et diffus soit en le globalisant. Le principe de cette estimation repose sur une équivalence entre le flux solaire incident et celui émis par un ou deux corps gris isotropes à la même température que le soleil. Les données météorologiques peuvent être analysées en termes de température entropique moyenne. Il devient ainsi possible de caractériser l'exergie d'un gisement solaire.

Nomenclature (hors symboles usuels)

B	flux d'exergie, $W.m^{-2}$		<i>Indices et exposants</i>
I	flux incident radiatif, $W.m^{-2}$	0	état de référence (300 K)
J, \mathbf{J}	flux d'entropie, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>cg</i>	corps gris
q, Q, \mathbf{q}	flux de chaleur, $W.m^{-2}$	<i>cn</i>	corps noir
T^*	température entropique moyenne, K	<i>dir</i>	direct
	<i>Symboles grecs</i>	<i>dif</i>	diffus
ε	émissivité totale hémisphérique	<i>g</i>	global
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$	<i>ha</i>	hors atmosphère
		<i>s</i>	du soleil ou bien solaire

1. Introduction

Constatant l'attractivité de plus en plus forte des énergies renouvelables, et en particulier de l'énergie solaire, il devient important de mettre en place une méthodologie rigoureuse pour l'analyse exergétique des systèmes solaires. En effet, comme indiqué dans de nombreux ouvrages, en particulier la célèbre référence [1], les analyses second principe, entropique comme exergétique, sont le seul moyen d'identifier, quantifier et comparer les différentes sources d'irréversibilité ; elles sont donc un passage obligé à toute démarche d'optimisation ou de comparaison entre systèmes. L'analyse des installations solaires présente une double difficulté : la source motrice est radiative et très fluctuante dans le temps.

Il en résulte que pour la source motrice la corrélation entre énergie, entropie (exergie) et température suit des lois différentes de celles en conduction [typiquement, $\mathbf{J} = T^r \mathbf{q}$]. De plus, une installation solaire n'est jamais en état stationnaire et subit quotidiennement les procédures de mise en marche et d'arrêt. Enfin, le climat (c.-à-d. les saisons en un même lieu, ou bien les différences d'un lieu à l'autre) a une influence évidente sur les performances. Afin de distinguer en quoi les performances dépendent du climat et en quoi elles dépendent de la machine elle-même, il faut pouvoir évaluer l'entropie (exergie) d'un gisement solaire donné et ce indépendamment du principe de la captation solaire.

2. L'entropie et l'exergie du flux solaire incident

2.1. Méthodologie

Les analyses second-principe de systèmes solaires sont rares dans la littérature, et elles n'abordent pas vraiment la question de l'entropie (exergie) du rayonnement solaire. Certains auteurs remarquent que la température du Soleil est très élevée, $T_s = 5770$ K, et appliquent au flux solaire la définition habituelle mais peu rigoureuse de l'entropie ($ds = \delta q/T$, soit pour le flux solaire $J_s = I_s / T_s$). Ils en déduisent que le flux d'exergie B_s associé au rayonnement solaire est pratiquement égal à I_s (en effet, $1 - T_0/T_s$ vaut 0,95 environ) et que le flux solaire peut être considéré comme à entropie nulle. Cette approche est insatisfaisante, d'abord parce qu'elle ne prend pas en compte la nature radiative du flux solaire, ensuite parce qu'elle ignore les pertes d'énergie et donc d'exergie entre le Soleil et la surface de la Terre. Autrement dit, elle ne fait aucune différence entre les climats. Or, il est très évident que de l'équateur aux pôles, le gisement solaire n'est pas le même.

D'autres auteurs, plus nombreux, ignorent les conversions et échanges en amont du fluide circulant dans le capteur. Ces auteurs considèrent comme exergie fournie au système l'exergie captée par le fluide à la température du capteur, soit : $B_{in} = Q_c(1 - T_0/T_c)$. Avec une telle approche, l'analyse second-principe ignorerait non seulement la conversion de l'énergie radiative en flux conductif/convectif, mais aussi toutes les pertes du capteur, infrarouges et convectives, ce qui rendrait impossible l'optimisation du système en y incluant les capteurs solaires.

La récente réf. [2] considère bien le flux effectivement incident sur les capteurs mais, focalisée sur les capteurs paraboliques, elle ne considère que le flux solaire direct.

Nous nous intéressons ici à l'entropie et l'exergie du flux solaire total effectivement incident sur les capteurs solaires. C'est la quantité qui permet, premièrement de distinguer les effets du climat de ceux du système solaire lui-même, deuxièmement d'évaluer la qualité exergétique d'un gisement solaire donné, troisièmement d'évaluer toutes les irréversibilités du système solaire complet, quatrièmement de comparer sur une même base soit différentes machines testées en un même lieu, soit une même machine en des lieux différents.

2.2. L'entropie des flux radiatifs solaires

2.2.1. Généralités

L'entropie d'un flux radiatif non-polarisé résulte de l'intégration sur le spectre de longueurs d'onde de l'expression de l'entropie monochromatique, que Planck a calculée à partir de la mécanique statistique à l'équilibre [3-5]. L'expression du flux d'entropie J_{cn} associé à l'émission d'un corps noir à la température T s'écrit alors :

$$J_{cn} = \frac{4}{3} \sigma T^3 = \frac{4}{3} \frac{I_{cn}}{T} \quad (1)$$

Pour un corps gris, cette expression devient [6-8] :

$$J_{cg} = \frac{4}{3} X(\varepsilon) \varepsilon \sigma T^3 = X(\varepsilon) \frac{4}{3} \frac{I_{cg}}{T} \quad (2)$$

où

$$X(\varepsilon) = \frac{45}{4\varepsilon\pi^4} \int_0^\infty x^2 [(1+f) \text{Ln}(1+f) + f \text{Ln}f] dx \quad ; \quad \text{avec} \quad f = \frac{\varepsilon}{e^x - 1} \quad (3)$$

2.2.2. Température entropique moyenne

La température entropique moyenne d'un flux ou quantité de chaleur est définie comme le rapport de cette quantité de chaleur par l'entropie qui lui est associée [9] : $T^* = \Delta Q / \Delta S$. Cette quantité s'avère très utile pour les analyses second-principe de procédés [10].

2.2.3. Entropie et exergie du flux solaire à la surface de la Terre

Avant d'atteindre la surface de la Terre, le rayonnement solaire doit d'abord parcourir 150 millions de kilomètres. En terme de radiance, ce parcours ne modifie pas le rapport entre entropie et flux, si bien que l'équation (1) s'applique au flux d'entropie hors atmosphère :

$$J_{ha} = \frac{4}{3} \frac{I_{ha}}{T_s} = 0.312 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} \quad (\text{le flux solaire hors atmosphère } I_{ha} \text{ vaut } 1356 \text{ W.m}^{-2}).$$

Ensuite, le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, ce qui a plusieurs effets. Tout d'abord, le rayonnement est partiellement absorbé/diffracté, plus ou moins selon les longueurs d'onde. En outre la lumière est en partie polarisée. Nous négligeons ici les effets des modifications du spectre et de la polarisation, surtout parce qu'ils sont faibles (pour plus de détails voir la réf. [11]), aussi parce que ces deux phénomènes ne sont absolument pas mesurés sur les installations solaire courantes. L'absorption et la diffraction font que le rayonnement arrive au sol scindé en deux composantes : le direct et le diffus. Ces deux composantes doivent être séparées pour l'analyse entropique.

Rayonnement direct : En terme de radiance, le rayonnement direct I_{dir} est équivalent au rayonnement d'un corps gris à la température du soleil, vu sous le même angle solide que le soleil, et dont l'émissivité serait $\varepsilon_{dir} = I_{dir} / (\cos \theta I_{ha})$ [θ = angle d'incidence]. Cette émissivité équivalente varie dans le temps, se situant dans la gamme 0,05-0,8. L'intégrale de l'équation (3) a été calculée sur cette gamme et nous proposons pour la fonction $X(\varepsilon)$ l'approximation $X_{dir}(\varepsilon)$ donnée ci-dessous, qui diffère légèrement de la fonction $(1 - 0.28 \text{ Ln } \varepsilon)$ mentionnée dans la réf. [2], et dont l'écart à la fonction $X(\varepsilon)$ ne dépasse pas 5.10^{-4} sur cette gamme de ε :

$$X_{dir}(\varepsilon) = 0.973 - 0.275 \text{ Ln} \varepsilon + 0.0273 \varepsilon \quad (4)$$

L'équation (2) donne l'entropie du rayonnement direct : $J_{dir} = X_{dir}(\varepsilon_{dir}).(4/3).(I_{dir} / T_s)$, d'où l'on déduit son exergie : $B_{dir} = I_{dir} - T_0 J_{dir}$.

Rayonnement diffus : Le rayonnement diffus I_{dif} est distribué sur toute l'hémisphère, mais son spectre de longueurs d'onde est bien celui émis par le Soleil. Ce rayonnement peut donc être assimilé au rayonnement d'un corps gris à la température du soleil, vu sous toute l'hémisphère, et dont l'émissivité serait $\varepsilon_{dif} = I_{dif} / (\sigma T_s^4)$. Cette émissivité équivalente varie dans le temps, se situant dans la gamme 10^{-6} - 10^{-5} . L'intégrale de l'équation (3) a été calculée sur cette gamme et nous proposons pour la fonction $X(\varepsilon)$ l'approximation $X_{dif}(\varepsilon)$ donnée ci-dessous, dont l'écart à la fonction $X(\varepsilon)$ ne dépasse pas 2.10^{-4} sur cette gamme de ε :

$$X_{dif}(\varepsilon) = 0.9659 - 0.2776 \text{ Ln} \varepsilon \quad (5)$$

L'équation (2) donne l'entropie du rayonnement diffus : $J_{dif} = X_{dif}(\varepsilon_{dif}).(4/3).(I_{dif} / T_s)$, d'où l'on déduit son exergie : $B_{dif} = I_{dif} - T_0 J_{dif}$.

Rayonnement direct + diffus : Lorsque l'on dispose de l'information détaillée sur les composantes directe et diffuse du flux solaire incident, l'entropie et l'exergie du rayonnement s'obtiennent en sommant $J_{dir} + J_{dif}$, et $B_{dir} + B_{dif}$ tels que définis ci-dessus. De même, la température entropique moyenne est calculée par $T_s^* = I_s / (J_{dir} + J_{dif})$. La Figure 1A montre, à titre d'exemple, comment varient ces deux dernières quantités avec le flux solaire dans le cas où la composante directe représente 75 % du flux solaire total. L'exergie est quasiment proportionnelle au flux solaire ($B \approx 0,86 \times I$) et T_s^* est de l'ordre de 2000 K, ce qui marque une nette diminution par rapport à la température du Soleil mais reste tout de même très élevée.

Rayonnement global : Sur certaines installations solaires, seul le rayonnement global, somme du direct et du diffus, est mesuré. En l'absence d'une hypothèse supplémentaire permettant d'évaluer les composantes directe et diffuse et de se retrouver alors dans le cas précédent, c'est ce flux solaire global qu'il faut analyser. L'idée sur laquelle la présente évaluation repose consiste à assimiler le rayonnement solaire global au rayonnement d'un autre corps gris, toujours à la température du soleil, toujours vu sous toute l'hémisphère, et dont l'émissivité serait cette fois lié au rayonnement global incident : $\varepsilon_g = I_s / (\sigma T_s^4)$. L'analyse utilise alors les mêmes formules et équations que pour l'analyse du diffus seul, ce qui aboutit au flux d'entropie global : $J_g = X_{dif}(\varepsilon_g) \cdot (4/3)(I_s / T_s)$ et à l'exergie et température entropique moyenne correspondantes. La Figure 1B montre comment varient ces deux dernières quantités avec le flux solaire global. L'exergie est toujours quasiment proportionnelle au flux solaire mais plus faible que précédemment ($B \approx 0,72 \times I$) et T_s^* est de l'ordre de 1000 K, ce qui se rapproche nettement de la température des capteurs plans eux-mêmes (env. 400 K).

2.3. Intégration sur la journée et sur une année de données météorologiques

Lors des expériences de réfrigérateur solaire à adsorption menées à Ouagadougou (Burkina-Faso) [12], des données météorologiques correspondant à une année type ont été calculées par le logiciel Meteonorm[®]. Elles incluent, entre autres, les flux solaires direct et diffus incidents sur le sol, donnés toutes les soixante minutes.

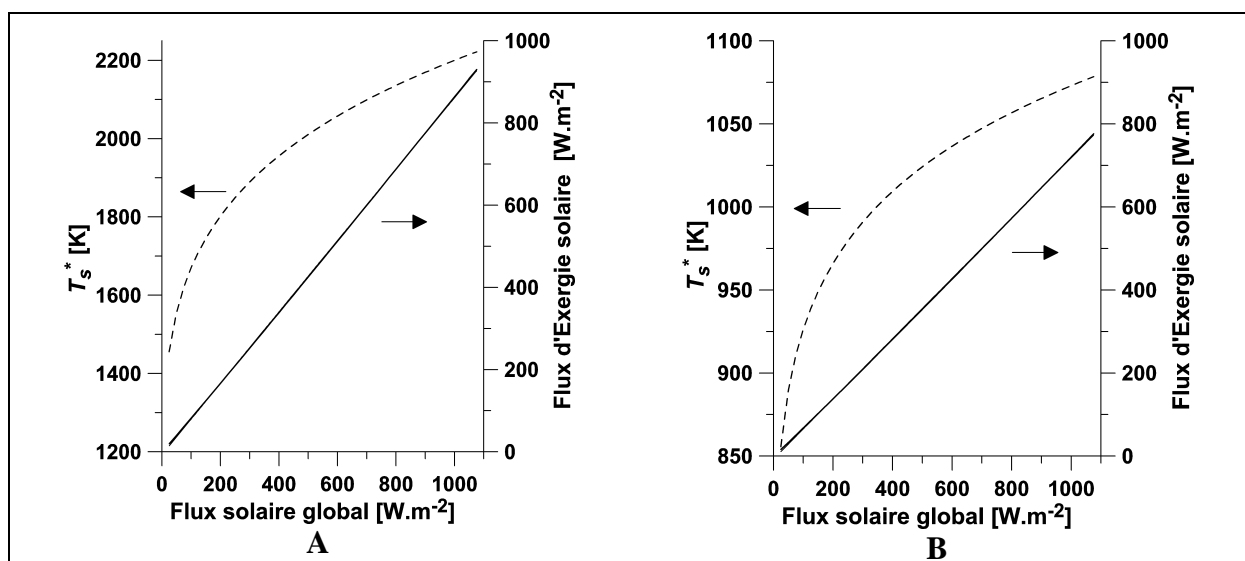


Figure 1 : Flux d'exergie (courbe continue) et température entropique moyenne (courbe discontinue) associés au flux solaire. **A** : lorsque la composante directe représente 75 % du rayonnement global ; **B** : flux solaire pris dans sa globalité.

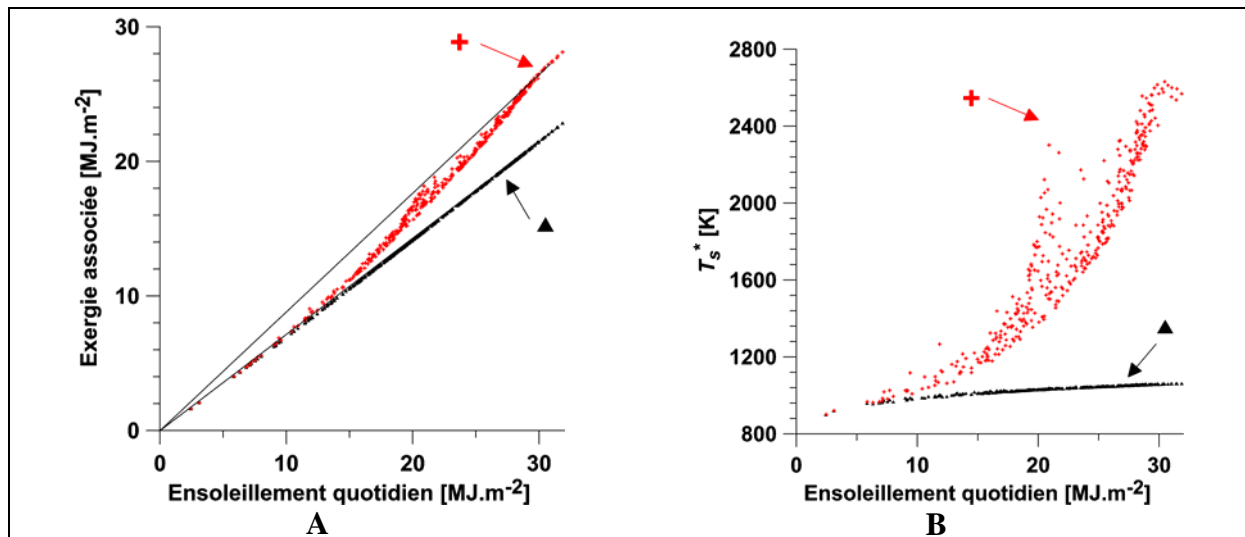


Figure 2 : Résultats de l'intégration quotidienne des flux d'entropie et d'exergie sur les données météorologiques de Ouagadougou en considérant direct et diffus séparément (+) ou bien globalement (▲). A : Exergie sommée sur la journée ; B : Température entropique moyenne pour chaque journée.

À chaque instant l'entropie et l'exergie liées au flux solaire peuvent être évaluées comme décrit ci-dessus, soit en considérant séparément le direct et le diffus, soit en les globalisant. L'intégration sur la journée donne pour chaque cas l'énergie, l'entropie et l'exergie quotidiennes, et la température entropique moyenne de la journée (rapport de l'énergie totale par l'entropie totale sur la journée). La Figure 2 rassemble les résultats. Il est notable que l'intégration sur la journée des flux globalisés conserve la proportionnalité entre exergie et énergie (voir Figure 2A symboles ▲) et ramène les températures entropiques moyennes pratiquement toutes autour de 1000 K. En revanche, la prise en compte différentielle des flux direct et diffus marque de très nettes différences que nous discutons ci-dessous.

3. Discussion

Ces développements montrent qu'il est possible d'évaluer l'entropie et l'exergie du rayonnement solaire simplement à partir des données habituellement mesurées sur une installation solaire. Évidemment, l'évaluation à partir des rayonnements direct et diffus est plus juste que celle basée sur le rayonnement global seul. Ce devrait donc être celle-là qu'il faudrait appliquer. Pourtant de nombreuses installations solaires utilisent des capteurs plans, lesquels captent de la même façon les rayonnements direct et diffus. Il n'est pas rare que sur ces installations seul le rayonnement global soit mesuré. Que représente alors la différence entre les deux évaluations d'exergie ?

La Figure 2A montre que les deux évaluations ne diffèrent que lorsque l'énergie incidente sur une journée est assez forte, supérieure à 15 MJ.m^{-2} . Par temps couvert, primo l'ensoleillement reste limité et cette valeur de 15 MJ.m^{-2} n'est guère atteinte, secundo la proportion de rayonnement direct reste faible, ce qui conduit à une évaluation semblable de l'exergie solaire par l'une et l'autre méthodes. On retrouve donc bien un fondamental météorologique. En revanche, par temps clair l'ensoleillement est évidemment à la fois assez fort, au dessus de 20 voire de 30 MJ.m^{-2} , contient une forte proportion de flux direct. La différence est alors notable entre l'évaluation globale, pour laquelle $B \approx 0,72 \times I$, et l'évaluation direct+diffus pour laquelle la valeur de l'exergie peut aller jusqu'à 88 % de l'ensoleillement (au-delà de 30 MJ.m^{-2} , mais aussi pour certains jours autour de 20 MJ.m^{-2} ,

probablement des jours très clairs). Le différentiel d'exergie entre les deux évaluations est donc lié à la proportion de rayonnement direct. Or le rayonnement direct est la composante du flux solaire valorisable au moyen de capteurs à concentration. Les capteurs plans, qui eux sont quasiment indifférents à la proportion de direct dans le flux total, ne tirent pas profit du caractère directionnel (ordonné donc) d'une partie du flux solaire. Cette incapacité doit bien se traduire par une perte d'exergie (production d'entropie), qui est justement le différentiel entre les deux évaluations. Cette exergie est perdue du fait même du choix de capteurs plans plutôt que de capteurs à concentration, quelle que soit l'efficacité du capteur plan elle ne pourra être réduite. Reste à étudier l'exergie perdue par le choix de capteurs à concentration.

La Figure 2B montre la température entropique moyenne pour chaque jour, proche des 1000 K mentionnés ci-dessus pour l'analyse globale et les jours couverts, augmentant fortement, jusqu'à même 2600 K, pour les jours clairs. Cette grandeur est très sensible à la qualité du rayonnement et le graphe présente des points marquants, tels que les deux courbes enveloppes, l'une pour ciel clair, l'autre pour ciel couvert. Noter aussi les accumulations de points. Ce graphe peut s'avérer très utile pour caractériser un gisement solaire.

4. Conclusion

L'entropie et l'exergie du rayonnement solaire incident peuvent facilement être évaluées à partir des mesures des rayonnements direct et diffus. Si seul le global est mesuré, une partie de l'information manque, et l'analyse est incomplète. Le choix d'utiliser des capteurs solaires sans concentration induit la perte d'un part de l'exergie solaire, perte incompressible.

Références

- [1] A. Bejan, *Advanced engineering thermodynamics*, Wiley, New York, (1988). Aussi M. Feidt, *Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes*, Tec et Doc 2^{ème} édition, 1996.
- [2] M. Öztürk, N. C. Bezir, and N. Özek, Optical, energetic and exergetic analyses of parabolic trough collectors, *Chin. Phys. Lett.*, 24-7 (2007), 1787-1790.
- [3] M. Planck, *The theory of heat radiation*, Dover Publications, New York, (1914).
- [4] R. Petela, Exergy of heat radiation, *Transactions ASME, J. Heat Transfer*, 86 (1964), 187-192.
- [5] A. Bejan, Unification of three different theories concerning the ideal conversion of enclosed radiation, *Transactions ASME J. Solar Energy Engineering*, 109-1 (1987), 46-51.
- [6] P. T. Landsberg and G. Tonge, Thermodynamics of the conversion of diluted radiation, *J. Physics A Mathematical and General*, 12-4 (1977), 551-562.
- [7] S. E. Wright, D. S. Scott, J. B. Haddow, and M. A. Rosen, On the entropy of radiative heat transfer in engineering thermodynamics, *Int. J. Engineering Science*, 39-15 (2001), 1691-1706.
- [8] S. E. Wright, Comparative analysis of the entropy of radiative heat transfer and heat conduction, *Int. J. Thermodynamics*, 10-1 (2007), 27-35.
- [9] F. Meunier, P. Neveu, and J. Castaing-Lasvignottes, Equivalent Carnot cycles for sorption refrigeration, *Int. J. Refrigeration*, 21-6 (1998), 472-489.
- [10] M. Pons, Analysis of the adsorption cycles with thermal regeneration based on the entropic mean temperatures, *Applied Thermal Engineering*, 17-7 (1997), 615-627.
- [11] S. Kabelac, Exergy of solar radiation, *Int. J. Energy Technology and Policy*, 3-1-2 (2005), 115-122.
- [12] F. Buchter, P. Dind, and M. Pons, An experimental solar-powered adsorptive refrigerator tested in Burkina-Faso, *Int. J. Refrigeration*, 26-1 (2003), 79-86.

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet **ORASOL** financé par l'**ANR-PREBAT** et coordonné par F. Lucas (LPBS, St-Pierre de la Réunion).