



**HAL**  
open science

## Réfrigération radiative. Effet de serre inverse

Ph. Grenier

► **To cite this version:**

Ph. Grenier. Réfrigération radiative. Effet de serre inverse. Revue de Physique Appliquée, 1979, 14 (1), pp.87-90. 10.1051/rphysap:0197900140108700 . jpa-00244594

**HAL Id: jpa-00244594**

**<https://hal.science/jpa-00244594>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification  
 Physics Abstracts  
 07.60D

## Réfrigération radiative. Effet de serre inverse

Ph. Grenier

Observatoire de Paris, section d'Astrophysique, 92190 Meudon, France

(Reçu le 15 juin 1978, accepté le 9 octobre 1978)

**Résumé.** — Nous étudions ici les possibilités offertes en réfrigération passive par l'inversion de l'effet de serre et donnons quelques résultats expérimentaux.

**Abstract.** — The possibility of increasing the radiative cooling by inversion of the *greenhouse effect* is discussed. Some experimental results are given.

**1. Introduction.** — La transparence atmosphérique dans l'infrarouge moyen (8-13  $\mu$ ), responsable du refroidissement nocturne par temps clair, a été exploitée depuis longtemps (Trombe [1]) en vue d'obtenir un effet frigorifique. Silvestrini *et al.* [2] ont montré que l'on pouvait, par utilisation comme surface émettrice d'un matériau sélectif, augmenter de façon importante la quantité d'énergie frigorifique récupérable par rapport à celle qui résulte de l'utilisation d'un corps noir. Nous nous proposons de montrer que l'on peut améliorer encore le fonctionnement d'une telle surface en la protégeant par une fenêtre elle aussi sélective. Nous réalisons ainsi l'inverse de l'effet de serre classique.

**2. Evaluation de la puissance disponible.** — Nous allons étudier le bilan radiatif d'un système (Fig. 1) composé d'une surface sélective horizontale (l'émetteur) au-dessus de laquelle est placé un film également sélectif, en négligeant les transferts de chaleur par conduction et convection. Nous supposons les effets de bord négligeables et effectuerons les bilans par unité de surface.

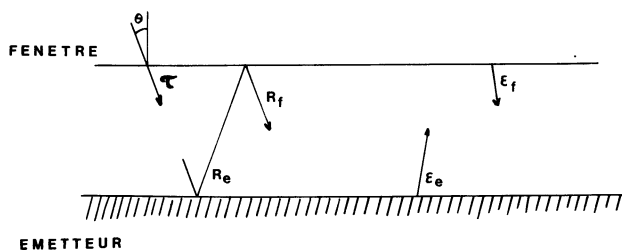


Fig. 1. — Caractéristiques optiques du système émetteur-fenêtre.  
 [Optical characteristics of the system *Emitter-Window*.]

Nous appellerons :

- $P_e$  la puissance rayonnée par l'émetteur vers le ciel.
- $P_f$  la puissance rayonnée par la fenêtre sur l'émetteur.
- $P_{at}$  la puissance rayonnée par l'atmosphère sur l'émetteur à travers le film.
- $P_s$  la puissance rayonnée par le soleil sur l'émetteur à travers le film et l'atmosphère.

Nous pouvons alors écrire, si les surfaces suivent la loi de Lambert :

$$P_e = 2 \pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta \times \int_0^\infty \frac{(1 - R_f(\theta, \lambda))}{1 - R_e(\theta, \lambda) \cdot R_f(\theta, \lambda)} \varepsilon_e(\lambda) B(\lambda, T_e) d\lambda d\theta$$

où  $\theta$  est la distance zénithale,  $B(\lambda, T_e)$  la fonction de Planck relative à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la température  $T_e$  de l'émetteur,  $R_f$  le coefficient de réflexion de la fenêtre côté émetteur,  $R_e$  celui de l'émetteur,  $\varepsilon_e$  l'émissivité de l'émetteur.

De même

$$P_f = 2 \pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta \times \int_0^\infty \frac{\varepsilon_f(\lambda) \cdot \varepsilon_e(\lambda)}{1 - R_e \cdot R_f} \cdot B(\lambda, T_f) d\lambda d\theta$$

et

$$P_{at} = 2 \pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta \times \int_0^\infty \frac{\tau(\theta, \lambda) \cdot \varepsilon_e(\lambda)}{1 - R_e \cdot R_f} \cdot E_{At}(\theta, \lambda) d\lambda d\theta$$

où  $\varepsilon_f$  et  $\tau$  sont respectivement l'émissivité et la transmittivité de la fenêtre,  $E_{at}(\theta, \lambda)$ , la brillance de l'atmosphère.

Enfin,

$$P_s = \int_0^\infty S(\theta_s, \lambda) \frac{\varepsilon_e(\lambda) \cdot \tau(\theta_s, \lambda)}{1 - R_e \cdot R_f} \cos \theta_s d\lambda$$

où  $\theta_s$  est la distance zénithale du soleil et  $S(\theta_s, \lambda)$  son intensité spectrale au sol.

La puissance frigorifique disponible sur l'émetteur à une température  $T_e$  donnée est alors :

$$P_u = P_e - (P_f + P_{at} + P_s).$$

Ces équations appellent les remarques suivantes :

a) La quasi-totalité de l'énergie disponible, si l'on se place à une température  $T_e$  inférieure à la température moyenne  $\bar{T}_{at}$  de l'atmosphère (température que nous définissons par :

$$B(\lambda, \bar{T}_{at}) = \frac{E_{at}(\lambda)}{\varepsilon_{at}(\lambda)},$$

provient de la fenêtre atmosphérique située entre 8 et 13  $\mu$ . Dans cette fenêtre l'intensité solaire est très faible (1 W/m<sup>2</sup>). Il est donc théoriquement possible de rendre très petite la fonction  $P_s$  par un choix convenable des coefficients  $\varepsilon_e$  et  $\tau$ , sans réduire la fonction  $P_e$ . Au contraire dans cette fenêtre l'émission thermique vers 300 K est maximale (Fig. 2).

b) Si  $T_e < T_{at}$  et  $T_f$ , ce qui est le cas pratique, la puissance  $P_u$  sera augmentée si les coefficients  $\tau$  et  $\varepsilon_e$  sont petits dans les domaines spectraux où l'émission atmosphérique est grande, c'est-à-dire en dessous

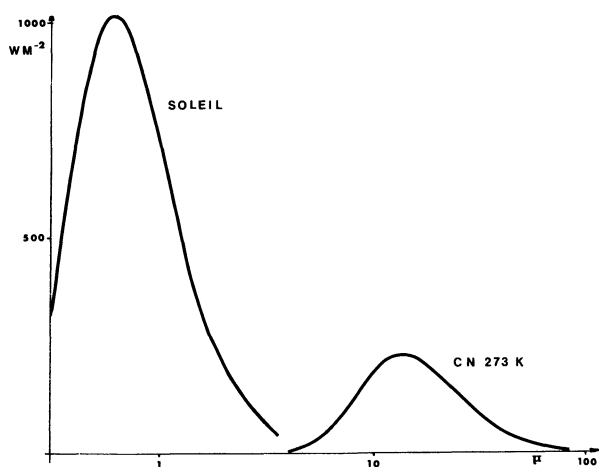


Fig. 2. — Fonctions  $\lambda \cdot B(\lambda, T)$  pour les températures ambiantes (273 K) et la température du soleil (5 900 K). Les surfaces sont proportionnelles respectivement au flux solaire hors atmosphère (1 400 W/m<sup>2</sup>) et aux flux du corps noir à 0 °C (315 W/m<sup>2</sup>).

[ $\lambda \cdot B(\lambda, T)$  functions for ambient temperature (273 K) and sun temperature (5 900 K). The surfaces are proportional to the solar flux above the atmosphere (1 400 W/m<sup>2</sup>) and to the black body at 0 °C (315 W/m<sup>2</sup>) respectively.]

de 8  $\mu$  et surtout au-delà de 13  $\mu$ . En prenant le cas limite d'une transparence atmosphérique parfaite entre 8 et 13  $\mu$  ( $E_{at}(\theta, \lambda) = 0$ ) d'un produit  $\varepsilon_e \cdot \tau$  unité dans ce domaine et nul ailleurs, nous trouvons le maximum d'énergie frigorifique disponible, fonction de la seule température  $T_e$  de l'émetteur. Celle-ci est portée figure 3.

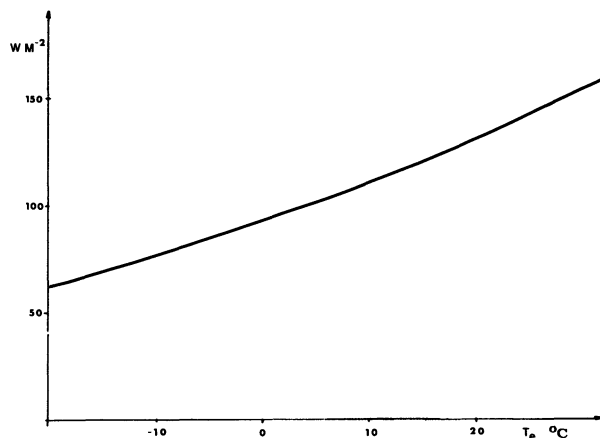


Fig. 3. — Puissance maximale utilisable en fonction de la température de l'émetteur dans la bande 8-13  $\mu$ .

[Maximal power available in the 8-13  $\mu$  band.]

3. **Choix des matériaux.** — L'étude systématique des propriétés spectrales des plastiques nous a conduit à sélectionner 2 matériaux : le Tedlar <sup>(1)</sup>, déjà utilisé par Silvestrini [2] et le TPX <sup>(2)</sup> (Fig. 4). Pour les

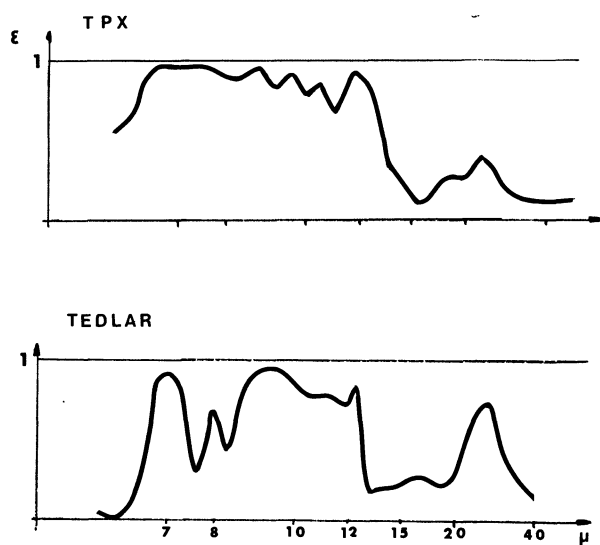


Fig. 4. — Emissivité d'un film de TPX de 340  $\mu$  et d'un film de Tedlar de 12,5  $\mu$  sur aluminium (incidence normale).

[Emissivity of a TPX 340  $\mu$  thick film and a Tedlar 12.5  $\mu$  thick film over Aluminium plate (normal incidence).]

(1) Marque déposée Dupont de Nemours.

(2) Marque déposée Mitsui Petrochemical Industries LTD.

comparer nous nous sommes placés dans le cas limite suivant :

$$\tau = 1 \quad \text{et} \quad E_{at}(\lambda) = 0 \quad \text{entre } 8 \text{ et } 13 \mu,$$

$E_{at}(\lambda) = B(\lambda, T_{at})$  entre 0 et 8  $\mu$ , et au-delà de 13  $\mu$ , avec  $T_{at} = 293 \text{ K}$  et  $T_e = 273 \text{ K}$ .

Nous trouvons alors pour le Tedlar de 12,5  $\mu$  d'épaisseur et le TPX de 340  $\mu$  (épaisseurs optimisées) les valeurs :

$$\text{Tedlar} : P_u = 49 \text{ W/m}^2.$$

$$\text{TPX} : P_u = 54 \text{ W/m}^2.$$

Le TPX est donc, selon notre critère, légèrement supérieur au Tedlar. Cependant ce dernier présente des caractéristiques de vieillissement supérieures et une meilleure transparence dans le visible. C'est donc lui que nous utiliserons dans la pratique.

Afin d'obtenir un effet frigorifique maximum de jour comme de nuit, nous avons vu qu'il est nécessaire de jouer sur la sélectivité de la fenêtre. La nécessité d'avoir une bonne transparence vers 10  $\mu$  limite le choix du matériau support au polyéthylène ou au polypropylène de 12,5  $\mu$  d'épaisseur.

Pour arrêter totalement l'énergie solaire, tout en conservant une bonne transparence infrarouge, on peut utiliser un semi-conducteur dont le *cutt-off* se situe au-delà du spectre solaire (2,5  $\mu$ ). Le tellure et le tellure de plomb, de propriétés optiques voisines, répondent à cette condition. Cependant, bien que l'absorption en couche mince à 10  $\mu$  soit négligeable, les indices très élevés (5,3 pour le tellure [3], 5,8 pour le tellure de plomb [4]) de ces 2 matériaux entraînent des pertes par réflexion très importantes : 65 % pour une couche d'indice 5,3 déposé sur un support d'indice 1,5. Pour y remédier trois solutions apparaissent :

a) Déposer une couche de tellure entre 2 couches anti-reflet d'indices et d'épaisseurs convenables.

b) Déposer une seule couche de tellure d'épaisseur

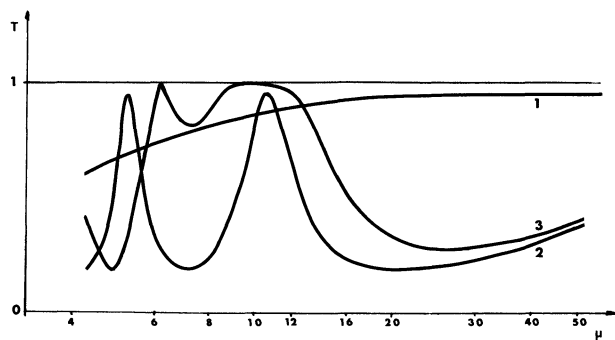


Fig. 5. — Transmission calculée de 3 dépôts sur polyéthylène : 1)  $T_e$  0,05  $\mu$ . 2)  $T_e$  1,1  $\mu$ . 3)  $\text{CdTe}$  (0,88  $\mu$ ) ;  $T_e$  (0,7  $\mu$ ) ;  $\text{ZnS}$  (1,0  $\mu$ ). Il n'est pas tenu compte de l'absorption du support (environ 8 % pour du PET de 50  $\mu$  d'épaisseur).

[Calculated transmission of 3 layers on polyethylene : 1)  $T_e$  0.05  $\mu$  thick. 2)  $T_e$  1.1  $\mu$ . 3)  $\text{CdTe}$  (0.88  $\mu$ ) ;  $T_e$  (0.7  $\mu$ ) ;  $\text{ZnS}$  (1.0  $\mu$ ). The absorption of PET (approximately 8 % for 50  $\mu$  thickness) is not included.]

optique  $\lambda/2$  pour  $\lambda = 11 \mu$ , soit une épaisseur de 1,1  $\mu$ . La transmission est alors voisine de l'unité à 11  $\mu$ .

c) Déposer une couche de tellure d'épaisseur suffisamment grande pour arrêter le rayonnement solaire, mais optiquement mince à 11  $\mu$  pour diminuer les pertes par réflexion. La transmission d'un tel dépôt de 500 Å d'épaisseur est d'environ 0,01 au centre du spectre visible.

Les transmissions infrarouges de ces 3 types de dépôt sont portées figure 5.

**4. Calcul de la puissance utile.** — Nous avons fait le calcul des puissances utiles disponibles dans les cas concrets suivants :

— L'émetteur est en aluminium couvert d'un film de Tedlar de 12,5  $\mu$  d'épaisseur ;

— La fenêtre est en polyéthylène de 50  $\mu$  d'épaisseur sur lequel est disposée l'une des 3 configurations précédentes.

Nous avons traité 2 cas d'émission atmosphérique. Le premier reprend les valeurs obtenues à Coco Beach par Bell *et al.* [5], le second celle de C. Robert à Odeillo [6].

Pour le calcul nous avons fait les hypothèses simplificatrices suivantes :

a) L'intégration sur les distances zénithales a été limitée à 60°. Au-delà la réflexion importante sur les surfaces rend négligeables les transferts par rayonnement.

b) L'émission atmosphérique a été supposée avoir lieu à une température moyenne  $\overline{T_{at}}(\lambda)$ , indépendante de la longueur d'onde et rapportée à une masse d'air moyenne de 1,3.

c) Les coefficients de réflexion et de transmission utilisés sont ceux de l'incidence normale.

La figure 6 donne les puissances obtenues sur l'émetteur en fonction de la température de celui-

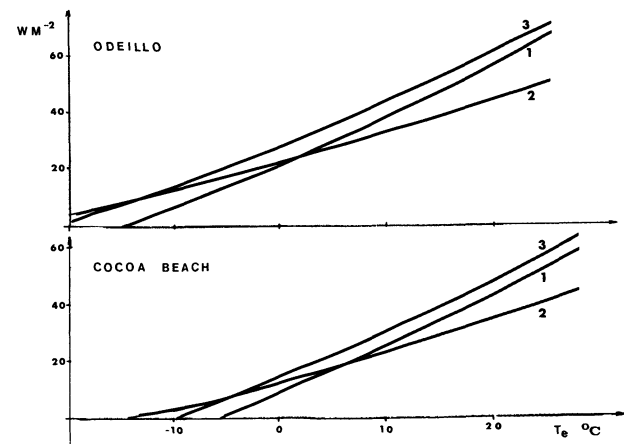


Fig. 6. — Puissance frigorifique calculée pour les atmosphères d'Odeillo et de Cocoa Beach avec les 3 dépôts de la figure 5 (voir texte).

[Calculated Cooling Power for Odeillo and Cocoa Beach (atmospheres) with the 3 deposits of figure 5 (see text).]

ci, pour une température atmosphérique de 20 °C, identique à celle de la fenêtre.

Nous voyons que la combinaison 3 est presque toujours la meilleure. Cependant nous n'avons pu jusqu'à présent obtenir de dépôts anti-reflet suffisamment adhérents. C'est pourquoi la combinaison 1 sera préférable dans la plupart des cas. Notons qu'en réalisant un dépôt d'épaisseur moitié sur chaque face du support, nous divisons par 2 les pertes par réflexion dans l'infrarouge, qui sont proportionnelles au carré de l'épaisseur, sans changer l'atténuation dans le visible, ce qui conduit à des performances accrues.

**5. Résultats expérimentaux.** — Nous avons, avec un petit prototype de 45 × 45 cm fait des mesures à la station astronomique de St-Véran (altitude 2 900 m). La combinaison 1 nous a fourni 55 W/m<sup>2</sup> à  $T_e = T_f$ , mais le dépôt n'était pas assez absorbant dans le visible pour avoir une puissance notable au soleil.

Avec la combinaison 2, nous avons obtenu :

32 W/m<sup>2</sup> pour  $T_e = T_f$ ,

26 W/m<sup>2</sup> pour  $T_f - T_e = 10$  °C,

aussi bien de jour que de nuit.

Nous construisons actuellement un prototype de 9 m<sup>2</sup> avec lequel nous pensons condenser, dans les régions désertiques, la vapeur d'eau atmosphérique.

#### Bibliographie

[1] TROMBE, F., *Revue Générale de Thermique* **6** (1967).

[2] CATALANOTTI, S. *et al.*, *Sol. Energy* **17** (1975) 83.

[3] HARTIG, P. A. and LOFERSKI, J. J., *J. Opt. Soc. Amer.* **44** (1954) 17.

[4] EVANS, C. S. and SEELEY, J. S., *J. Physique Colloq.* **29** (1968) C 4-37.

[5] BELL, E. E. *et al.*, *J. Opt. Soc. Amer.* **50** (1960) 1313.

[6] ROBERT, C., Thèse de l'Université de Paris VII (1976).