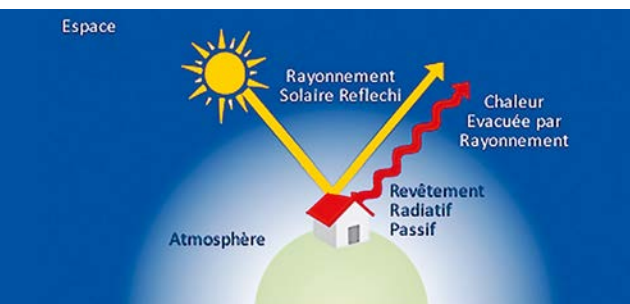


REFROIDISSEMENT RADIATIF DIURNE PAR REVÊTEMENT DE FIBRES DE SILICE

Karl Joulain*, Refet Ali Yalçın, Jérémie Drévilion, Etienne Blandre

Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, 86073 Poitiers Cedex

*karl.joulain@univ-poitiers.fr



Le refroidissement radiatif diurne est un procédé de refroidissement passif nécessitant des revêtements très réfléchissants dans le visible et fortement absorbants dans l'infrarouge. De la laine de verre constituée de fibres extrêmement fines de silice permet d'obtenir des puissances de refroidissement proches du maximum théorique à un coût potentiellement très bas.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010528>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Le contrôle de la température est depuis toujours un enjeu important que cela soit pour des raisons de confort thermique, de conservation des denrées périssables ou de fonctionnalité de certains produits manufacturés. Si les procédés de chauffage sont nombreux et très faciles à mettre en œuvre, le refroidissement est en général plus ardu avec moins de méthodes à disposition.

Certaines d'entre elles sont cependant très simples. On sait depuis très longtemps que le refroidissement peut être important la nuit notamment dans les situations de grandes étendues plates comme des hauts plateaux et en l'absence de couverture

nuageuse et d'humidité. Ce refroidissement, d'origine radiative, est dû à la transparence de l'atmosphère dans la partie infrarouge du spectre pour des longueurs d'ondes comprises entre 8 et 13 microns. Dans cette plage de longueur d'onde, le sol échange directement avec le vide spatial c'est-à-dire avec le rayonnement cosmologique à 3 K. L'efficacité de ce refroidissement dépend essentiellement des conditions locales comme la température ambiante, le relief et surtout l'humidité de l'air.

Moins connue est la possibilité d'obtenir un refroidissement radiatif de jour [1]. Si ce refroidissement est tout comme en conditions nocturnes, très favorisé en l'absence de couverture nuageuse et d'humidité

en raison d'une meilleure transparence de l'atmosphère dans l'infrarouge, celui-ci est cependant diminué par l'absorption du rayonnement solaire. Cette absorption ne dépend pas des conditions locales mais essentiellement des propriétés radiatives du corps que l'on veut refroidir. D'un point de vue théorique, un refroidissement radiatif diurne sera fortement favorisé si l'objet visé par cette application est fortement réfléchissant et le moins absorbant dans le spectre d'émission du soleil (lumière visible et proche infrarouge) et fortement émettant dans la bande de transparence de l'atmosphère située dans l'infrarouge moyen (voir figure en tête de l'article).

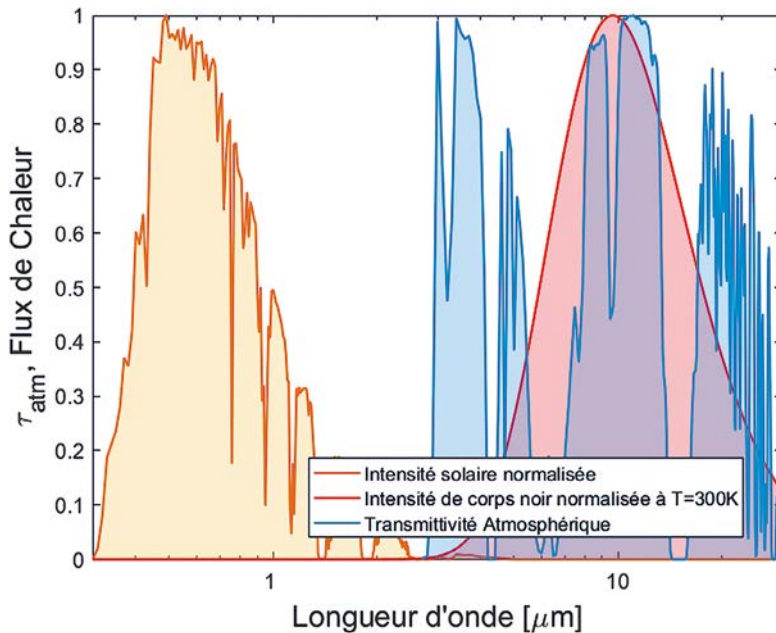


Figure 1. Spectre du flux solaire incident, transmittance de l'atmosphère et spectre d'émission du corps noir à température ambiante ($T = 300 \text{ K}$).

UN REVÊTEMENT RÉFLÉCHISSANT DANS LE VISIBLE ET ABSORBANT DANS L'INFRAROUGE

On peut appréhender ces conditions en observant les courbes de la figure 1 sur lesquelles on observe le rayonnement solaire, le rayonnement thermique infrarouge de corps considéré et la transparence de l'atmosphère.

Nous pouvons formaliser la puissance de refroidissement en présence d'éclairement solaire de la manière suivante :

$$P_{cool} = P_{rad} - P_{atm} - P_{solar},$$

où P_{rad} est la puissance émise par unité de surface par la surface de l'objet soumise au refroidissement, P_{atm} est la puissance par unité de surface échangée radiative avec l'atmosphère, P_{solar} est enfin la puissance du rayonnement solaire incident absorbée par la surface. Ces grandeurs s'expriment selon les relations suivantes :

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \int_{2\pi} \int_0^\infty I_{bb}(\lambda, T=T_{sur}) \varepsilon(\lambda, \theta) \cos\theta d\lambda d\Omega \\ P_{atm} &= \int_{2\pi} \int_0^\infty I_{bb}(\lambda, T=T_{amb}) \alpha(\lambda, \theta) \varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) \cos\theta d\lambda d\Omega \\ P_{solar} &= \int_0^\infty I_{solar}(\lambda) \alpha(\lambda, \theta)_{\theta=0} d\lambda \end{aligned}$$

Ces quantités dépendent des propriétés radiatives de l'objet à refroidir, notamment son absorptivité spectrale $\alpha(\lambda, \theta)$ par ailleurs égale à son émissivité $\varepsilon(\lambda, \theta)$ (voir l'article Comprendre

la loi de Kirchhoff de ce numéro), où λ est la longueur considérée et θ la direction du rayonnement incident, et bien sûr de l'intensité de corps noir $I_{bb}(\lambda, T)$ et de l'irradiation solaire $I_{solar}(\lambda)$. L'émissivité de l'atmosphère est quant à elle reliée à la transparence de l'atmosphère $t(\lambda)$ par l'expression $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) = 1 - t(\lambda)^{1/\cos\theta}$. Il apparaît donc effectivement mathématiquement dans ces formules que la puissance de refroidissement sera d'autant plus grande que l'absorption du rayonnement solaire par la surface sera faible, que l'atmosphère sera transparente et que la surface sera émissive dans l'infrarouge. La transparence de l'atmosphère ne peut pas descendre en dessous de certaines valeurs correspondant à des conditions atmosphériques ultra sèches. Dans des conditions où par exemple la température ambiante et la température de la surface sont égales à 300 K, le maximum théorique de refroidissement dans lequel le matériau conçu serait parfaitement émettant (ou absorbant) dans l'infrarouge et parfaitement réfléchissant dans le visible vaut 191 W.m^{-2} .

Cette valeur est aussi la puissance de refroidissement maximale pour un corps noir la nuit au travers l'atmosphère lorsque la température de surface et la température ambiante sont égales à 300 K.

RÉFLEXION PAR DIFFUSION NON ABSORBANTE

Pour atteindre des puissances de refroidissement élevées, plusieurs stratégies peuvent être explorées comme nous allons le montrer dans la suite. La première et sans doute la plus simple consiste à coupler une couche de silice qui est transparente et non absorbante dans le visible et pratiquement un corps noir dans l'infrarouge avec une couche métallique réfléchissante. Un tel assemblage permet d'atteindre une puissance de refroidissement de 89 W.m^{-2} , valeur obtenue en calculant la réflectivité et l'absorptivité spectrale d'une couche de silice déposée sur un substrat d'argent. Comme on le voit, cette idée naïve donne une puissance de refroidissement non négligeable mais encore loin des maxima théoriques. Une analyse plus fine montre que c'est l'absorption du rayonnement solaire, de l'ordre de 50 W.m^{-2} , qui obère les performances de ce dispositif.

L'augmentation de la réflectivité du revêtement est donc le paramètre clé pour viser un meilleur refroidissement radiatif. Une des stratégies consiste à utiliser un milieu non absorbant et diffusant dans le visible mais qui est fortement émettant dans l'infrarouge moyen. En effet, un milieu fortement diffusant non absorbant dans le visible devient très réfléchissant si son épaisseur est plus grande que la longueur de transport. Cette longueur de transport est la distance à partir de laquelle un rayonnement incident collimaté à l'entrée du milieu devient isotrope dans ce milieu en raison des multiples diffusions auxquelles il est soumis. C'est un phénomène qui s'observe lorsque l'on voyage en avion au-dessus d'une couche de nuage épaisse. Une telle couche vue du dessus ●●●

apparaît très lumineuse en raison du fait qu'elle réfléchit quasiment intégralement le rayonnement solaire. C'est le même principe qui gouverne la fabrication de peinture blanche ou bien l'efficacité de certaines crèmes solaires.

Ces dernières années, plusieurs études ont été menées pour obtenir des revêtements performants présentant un bon pouvoir refroidissant. Elles ont notamment utilisé des particules sphériques de silice dans une matrice de type PMMA [2]. La silice est en effet un excellent matériau pour fabriquer des particules diffusantes car ce matériau est transparent dans le visible et fortement émettant dans l'infrarouge moyen.

Les performances de ces matériaux composites, déjà intéressantes, peuvent néanmoins être améliorées en augmentant le contraste d'indice entre les particules diffusantes et la matrice dans laquelle elles sont enfermées. Une solution peut être de remplacer la matrice transparente (d'indice supérieur à 1) dans laquelle les particules sont emprisonnées par le vide (d'indice égal à 1). On comprend malheureusement facilement que ce type de solution est difficilement envisageable pour des particules sphériques. En revanche des diffuseurs comme des fibres de silice analogues aux fibres présentes dans les isolants de type laine de verre peuvent facilement s'auto supporter.

UNE LAINE DE VERRE COMME REVÊTEMENT

Dans notre laboratoire à l'institut P' de Poitiers, nous avons étudié un revêtement constitué d'un ensemble de fibres déposées sur un substrat noir (Fig. 2) [3].

Pour obtenir l'émissivité (et donc l'absorptivité) et la réflectivité du revêtement, nous avons utilisé une méthode statistique, la méthode de Monte-Carlo. Le principe de cette méthode est le suivant : pour une fréquence et une direction données, un ensemble de rayons est envoyé sur le revêtement proposé, dont les fibres présentent une distribution

d'orientation autour de l'horizontale. La section efficace de diffusion d'une fibre unique est bien connue et basée sur un calcul électromagnétique exact analogue à la théorie de Mie [4]. Pour un rayon donné, on tire une orientation selon la fonction de distribution d'orientation des fibres. À partir des expressions donnant les sections efficaces de diffusion ou d'absorption, on en déduit une probabilité de diffusion ou d'absorption du rayon considéré. Un tirage aléatoire permet d'en déduire si le rayon est absorbé ou diffusé par cette fibre. S'il est absorbé, le rayon contribue à l'absorption. S'il est diffusé, il continue sa course jusqu'à une autre fibre ou bien jusqu'aux frontières du domaine où il pourra être considéré comme réfléchi s'il sort par la face d'entrée ou absorbé s'il sort par la face de sortie. Le nombre considérable de rayons tirés permet d'en déduire statistiquement les réflectivités et émissivités spectrales et directionnelles du revêtement.

Il est à noter que ces considérations ne sont valables que lorsque l'on se place dans le régime de diffusion indépendante dans lequel il n'y a pas d'évènement de diffusion multiple entre les diffuseurs. Ceci est vérifié lorsque la taille des diffuseurs (fibres ou particules sphériques) est bien plus petite que la distance entre ces diffuseurs. Une concentration volumique inférieure à une dizaine de pourcent assure en pratique cette condition.

Une fois les propriétés radiatives

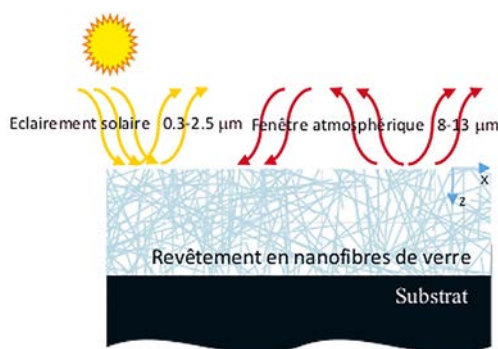
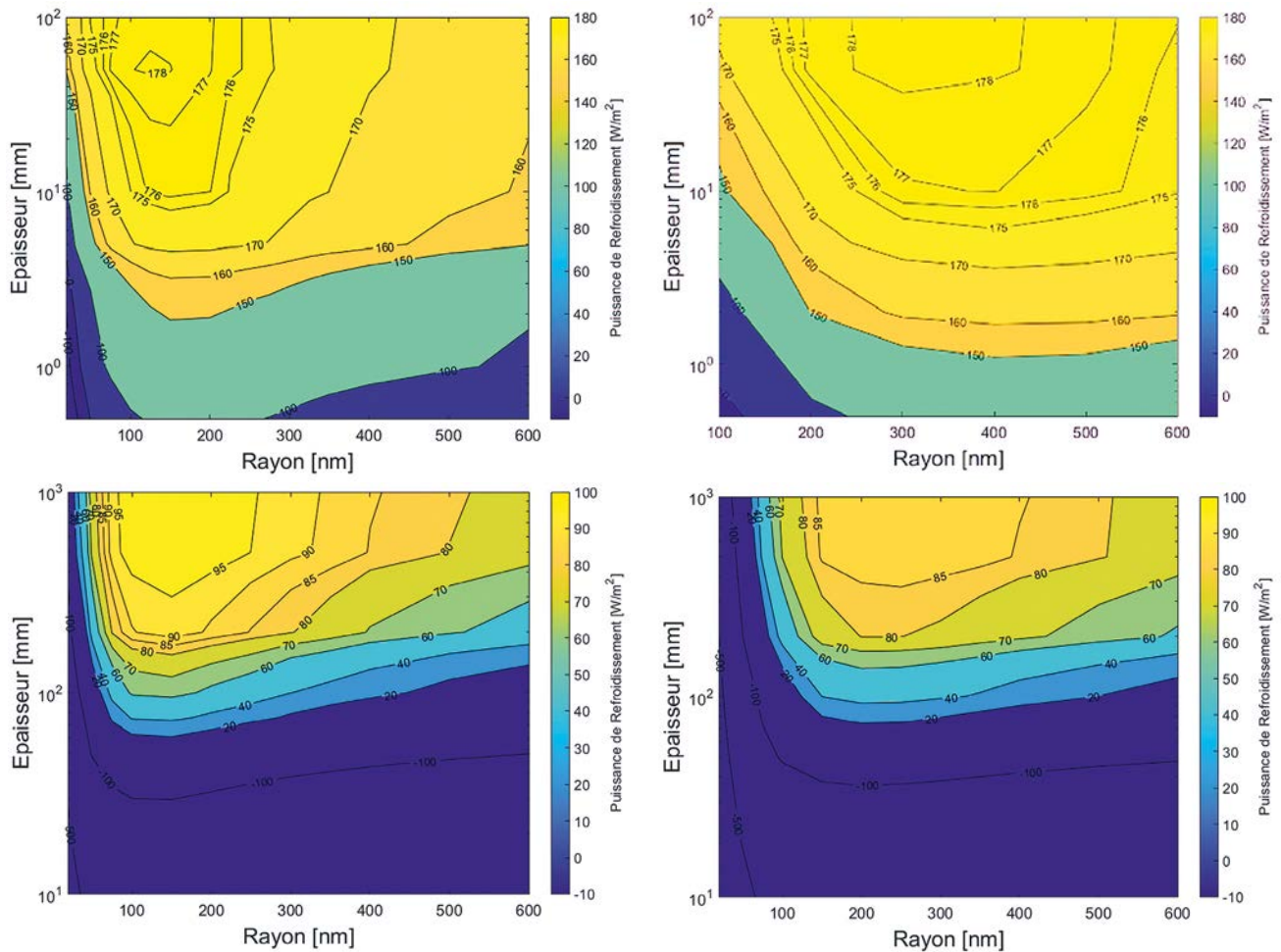


Figure 2.

Revêtement proposé pour le refroidissement radiatif constitué d'un ensemble de fibres de silice dispersées au-dessus d'un substrat noir.

du revêtement ainsi déterminées, nous avons calculé la puissance de refroidissement en conditions diurnes pour 4 types de situations. Fibres en suspension dans l'air, sphères en suspension dans l'air, fibres dans une matrice transparente de type résine acrylique (indice 1,5), sphère dans une matrice transparente identique au cas précédent. Dans les 4 cas, une certaine épaisseur de ces matériaux composites est déposée sur un corps noir ce qui constitue la situation la plus défavorable. Sur la figure 3 sont représentées les puissances de refroidissement calculées pour différentes épaisseurs et différents diamètres de diffuseurs dans le cas d'une fraction volumique de diffuseurs de 4 %. On note un optimum de puissance dans tous les cas de figure pour des tailles de diffuseurs de quelques centaines de nm. Pour des diffuseurs dans l'air, l'épaisseur optimale est de quelques dizaines de mm tandis qu'elle est de plusieurs dizaines de cm dans le cas d'une matrice en résine acrylique. On note également que la puissance de refroidissement est presque deux fois supérieure pour des diffuseurs dispersés dans l'air que dans le cas où ils sont dispersés dans une matrice. Elle atteint une valeur de 178 W.m^{-2} assez proche du maximum théorique. On voit donc le grand intérêt à utiliser des diffuseurs dispersés dans l'air et donc à utiliser des fibres qui même si elles sont un peu moins performantes que les sphères ont l'avantage de pouvoir être effectivement maintenues facilement en suspension dans l'air.

Sur cet exemple simple d'un revêtement constitué de diffuseurs de SiO_2 en suspension, nous avons vu que des puissances de refroidissement élevées pouvaient être atteintes. D'autres stratégies plus complexes peuvent être élaborées. Il est ainsi possible d'améliorer sensiblement la puissance de refroidissement d'un système multicouche comme le revêtement constitué d'une couche de silice déposée sur un substrat d'argent [5]. Dans ce cas précis, nous avons montré qu'en gravant un réseau bidimensionnel à la surface de ce système d'une période



de 5 microns et de fraction volumique 0,5, il était possible d'atteindre une puissance de refroidissement de $114 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, supérieure de plus de 25 % à ce qu'elle est sur la surface nue.

QUEL AVENIR POUR CES REVÊTEMENTS ?

La question de la fabrication à grande échelle et de la soutenabilité économique de tels revêtements est évidemment importante. Si les processus de gravure de périodes micrométriques sont difficilement envisageables à l'échelle d'un bâtiment, la fabrication de fibres de silice nanométriques l'est si on est capable de gagner un ordre de grandeur sur le diamètre des fibres qui dépend de la capacité à faire passer de la silice fondue au travers d'une buse de quelques centaines de nm de diamètre. Un tel processus de fabrication, proche de celui de la laine de verre, permettrait une production à bas coût. Une autre

question est l'acceptabilité esthétique de tels revêtements qui doivent être le plus « blanc » possible pour diminuer leur absorptivité dans le visible. Développer des revêtements colorés est néanmoins envisageable tout en conservant des performances de refroidissement honorables comme l'ont montré deux de nos études récentes où la colorisation peut être obtenue à l'aide de diffuseurs de type cœur coquille ou bien en introduisant des bandes d'absorption à l'aide de cavités résonnantes dans des multicouches [5,6].

Si beaucoup reste à faire pour ajuster les propriétés optiques de matériaux composites aux conditions optimales du refroidissement radiatif et pour trouver un procédé industriel de fabrication très peu onéreux, il reste que ce procédé passif offre une option très intéressante sur le plan énergétique pour le management thermique des objets. ●

Figure 3.

Puissance nette de refroidissement pour différentes épaisseurs de revêtements et diamètres de diffuseurs pour une fraction volumique de 4% et pour 4 situations (a) fibres en suspension dans l'air, (b) sphères en suspension dans l'air, (c) fibres en suspension dans une matrice transparente d'indice 1,5, (d) sphères en suspension dans une matrice transparent d'indice 1,5.

RÉFÉRENCES

- [1] E. Rephaeli *et al.*, *Nano Lett.* **13**, 1457 (2013)
- [2] Y. Zhai *et al.*, *Science* **355**, 1062 (2017)
- [3] R. A. Yalçın *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **206**, 110320 (2020)
- [4] C. F. Bohren et D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, 1st edn, (Wiley, New-York, 1998)
- [5] E. Blandre *et al.*, *Opt. Express* **28**, 29703 (2020)
- [6] R. A. Yalçın *et al.*, *ACS Photonics* **7**, 1312 (2020)