

[Passer au contenu principal](#)

1. [la nature](#)
2. [communications nature](#)
3. [des articles](#)
4. [article](#)

Journal de recherche sur la nature

MENU

[Chercher](#)[Alerte électronique](#)[Soumettre](#)[S'identifier](#)

Nous aimerions comprendre comment vous utilisez nos sites Web afin de les améliorer. [Enregistrez votre intérêt.](#)

- [Accès libre](#)
- [Publié: 13 décembre 2016](#)

# Refroidissement radiatif à des températures très basses sous un cycle de 24 h jour-nuit

- [Zhen Chen](#) ,
- [Linxiao Zhu](#) ,
- [Aaswath Raman](#) &
- [Fan de Shanhui](#)

[Communications Nature](#) **le volume 7** , Numéro de l'article: 13729 ( 2016 ) [Citer cet article](#)

- **8859** Accès
- **168** Citations
- **78** Altmetric
- [Métrique](#)détails

## Abstrait

La technologie de refroidissement radiatif utilise la fenêtre de transparence atmosphérique (8–13  $\mu\text{m}$ ) pour dissiper passivement la chaleur de la Terre dans l'espace (3 K). Cette technologie a suscité un large intérêt à la fois dans les sciences fondamentales et dans les applications du monde réel, allant du refroidissement passif des bâtiments, de la récupération d'énergie renouvelable et de la réfrigération

passive dans les régions arides. Cependant, la réduction de température démontrée expérimentalement, jusqu'à présent, a été relativement modeste. Ici, nous montrons théoriquement qu'une réduction de température ultra-importante jusqu'à 60 ° C de la température ambiante est réalisable en utilisant un émetteur thermique sélectif et en éliminant la charge thermique parasite, et démontrons expérimentalement une réduction de température qui dépasse de loin les travaux précédents. Dans une zone peuplée au niveau de la mer,

[Télécharger le PDF](#)

## introduction

---

De considérations thermodynamiques fondamentales, la conversion à haut rendement de la chaleur au travail nécessite à la fois une source de chaleur à haute température et un dissipateur de chaleur à basse température. La grande majorité des processus de conversion d'énergie utilisent actuellement notre environnement ambiant ici sur Terre comme dissipateur de chaleur. D'autre part, l'espace, à une température de 3 K, fournit un dissipateur de chaleur beaucoup plus froid. De plus, l'atmosphère terrestre a une fenêtre de transparence dans la gamme de longueurs d'onde de 8 à 13  $\mu\text{m}$  qui coïncide avec le pic du spectre du corps noir des températures terrestres typiques  $\sim 300$  K, permettant le processus de refroidissement radiatif, c'est-à-dire l'éjection radiative de la chaleur de la Terre vers l'espace, et donc l'accès radiatif direct à ce radiateur plus froid. L'exploitation du refroidissement radiatif a donc le potentiel d'améliorer considérablement un large éventail de processus de conversion et d'utilisation de l'énergie sur Terre.

L'étude du refroidissement radiatif a une longue histoire [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#) [8](#) [9](#) [10](#) [11](#) [12](#) [13](#) [14](#) [15](#) [16](#) [17](#) [18](#) [19](#) [20](#) [21](#) . Il est bien connu depuis l'Antiquité, qu'un radiateur noir face à un ciel nocturne clair peut atteindre une température sous-ambiante [16](#). Plus récemment, un refroidissement radiatif diurne sous la lumière directe du soleil a été démontré [17](#) , où l'on a utilisé un radiateur spécialement conçu qui réfléchit la majeure partie de la lumière du soleil, mais qui rayonne efficacement dans la fenêtre de transparence atmosphérique. Cependant, les performances démontrées jusqu'à présent ont été plutôt limitées. Pour le refroidissement nocturne [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#) [8](#) [9](#) [10](#) , dans les zones peuplées typiques, la réduction de température démontrée de l'air ambiant est de l'ordre de 15 à 20 ° C. Une réduction de la température pouvant atteindre 40 ° C n'a été démontrée que dans des zones désertiques de haute altitude avec une humidité extrêmement faible [2](#). Pour le refroidissement diurne [17](#) , la réduction de température démontrée est d'environ 5 ° C. Une question ouverte importante est alors: quelle est la limite fondamentale de la réduction de température qui peut être atteinte dans les zones peuplées typiques de la Terre?

Dans cet article, nous montrons d'abord théoriquement que des réductions de température ultra-importantes jusqu'à  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  en dessous de la température ambiante peuvent être obtenues. La clé d'une telle réduction de température ultra-importante est d'utiliser un émetteur thermique hautement sélectif adapté à la fenêtre de transparence atmosphérique et de minimiser les pertes de chaleur parasites. Expérimentalement, nous démontrons un appareil qui présente un refroidissement passif continu tout au long du jour et de la nuit. Dans un cycle jour-nuit de 24 h en hiver, le refroidisseur est maintenu à une température qui est au moins  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  inférieure à la température de l'air ambiant, avec une réduction de température maximale de  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , qui se produit lorsque l'appareil contenant le refroidisseur est exposé pour atteindre l'irradiance solaire maximale.

## Résultats

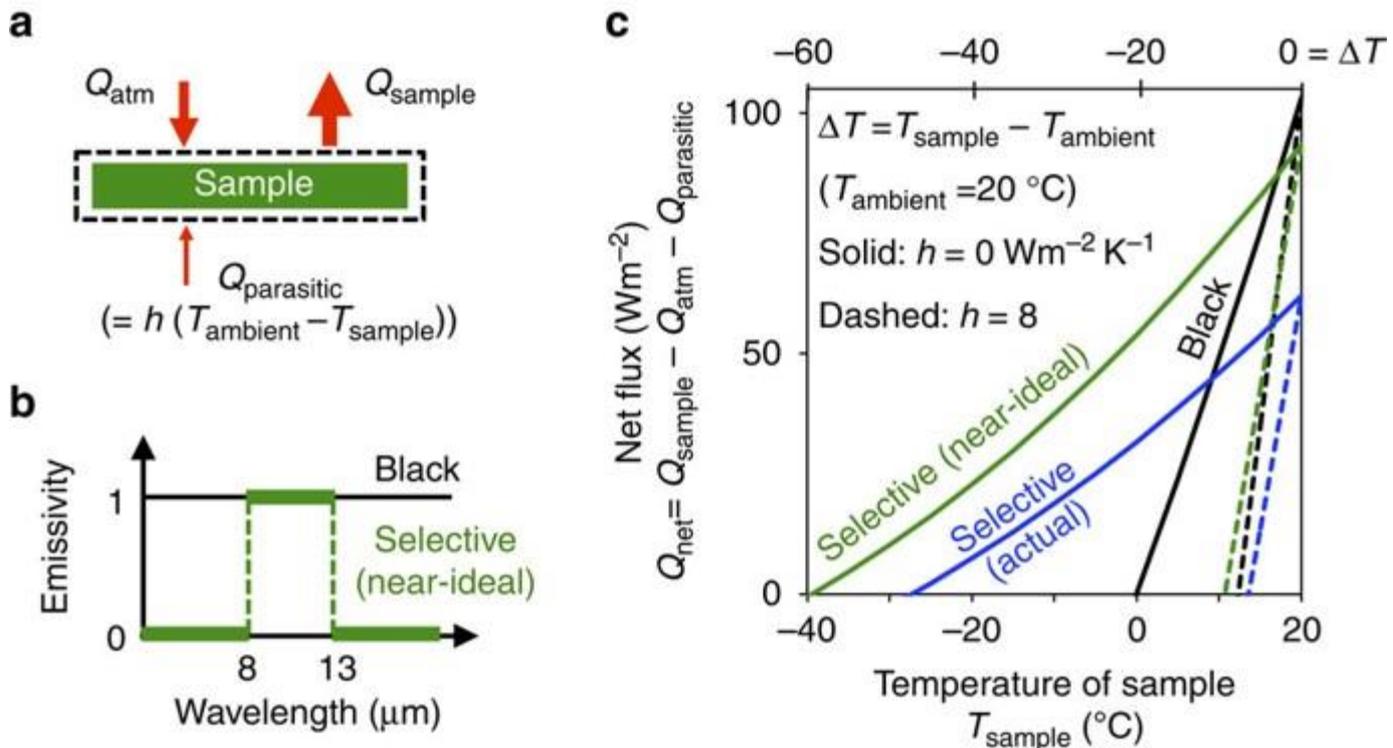
---

### Analyse théorique

Pour illustrer la voie vers une réduction de température ultra-importante, nous considérons d'abord le cas idéal, où l'atmosphère est 100% transparente à une gamme de longueurs d'onde particulière en dehors du spectre solaire. Dans un tel cas, un émetteur qui a une émissivité non nulle dans cette gamme de longueurs d'onde, et une émissivité nulle à l'extérieur, atteindra la température de l'espace extra-atmosphérique de 3 K en l'absence de perte de chaleur parasite, car dans ce cas, l'émetteur subit échange thermique uniquement avec l'espace.

Pour un cas plus réaliste, nous effectuons l'analyse théorique comme illustré sur la [figure 1](#), où la transmittance de l'atmosphère est considérée comme typique de Stanford, en Californie en hiver ([figure supplémentaire 2](#)). Ici, pour plus de simplicité, nous analysons les performances du refroidissement nocturne. La performance du refroidissement nocturne fournit la limite supérieure pour la performance pendant la journée, une limite supérieure qui peut être atteinte en supprimant complètement le rayonnement solaire sur l'émetteur.

**Figure 1: Analyse théorique.**



( a ) Bilan énergétique appliqué à l'émetteur radiatif (ligne pointillée). Le flux net ( $Q_{\text{net}}$ ) est déterminé par le flux sortant de l'émission de l'échantillon ( $Q_{\text{échantillon}}$ ), et les deux flux entrants de l'émission de l'atmosphère ( $Q_{\text{atm}}$ ) et les pertes de chaleur parasites ( $Q_{\text{parasitic}}$ ) caractérisées par un coefficient de transfert de chaleur  $h$ . ( b ) Trois émetteurs sont considérés: un émetteur noir (ligne noire), un émetteur sélectif quasi idéal (ligne verte) et l'émetteur sélectif réel (ligne bleue sur la [figure 3b](#)) de ce travail. ( c ) Flux net ( $Q_{\text{net}}$ ) en fonction de la température de l'échantillon ( $T_{\text{échantillon}}$ ). Notez que le calcul est basé sur une transmittance atmosphérique typique à Stanford en hiver (ligne grise sur la [figure 3b](#)). Le paramètre clé est la température en régime permanent correspondant à  $Q_{\text{net}} = 0$ . L'analyse met en évidence les deux ingrédients clés pour obtenir une forte réduction de température en dessous de la température ambiante: la sélectivité de l'émetteur et la minimisation de la perte de chaleur parasite. Les performances de l'émetteur sélectif réel (bleu) conçu et testé dans ce travail sont également prédites.

[Image en taille réelle](#)

La température à l'état stationnaire d'un émetteur radiatif est déterminée par le bilan énergétique entre trois composants clés ( [Fig. 1a](#) ; voir la [note complémentaire 4](#) pour une analyse détaillée): le rayonnement thermique émis par l'échantillon ( $Q_{\text{échantillon}}$ ), le rayonnement thermique absorbé par l'atmosphère ( $Q_{\text{atm}}$ ) et les pertes de chaleur parasites ( $Q_{\text{parasitic}}$ ) caractérisées par un coefficient de transfert de chaleur  $h$ . Nous considérons trois émetteurs différents: un émetteur noir, un émetteur sélectif quasi idéal ( [Fig. 1b](#)) qui a une émissivité unitaire à l'intérieur de la fenêtre de transparence atmosphérique (8–13  $\mu\text{m}$ ) et une émissivité nulle à

l'extérieur, et l'émetteur sélectif réel utilisé dans ce travail. Sur la [figure 1c](#), nous traçons le flux net,

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{sample}} - Q_{\text{atm}} - Q_{\text{parasitic}}, \quad (1)$$

en fonction de la température de l'échantillon,  $T_{\text{échantillon}}$ . La température à l'état stationnaire de l'échantillon est atteinte lorsque le flux net ( $Q_{\text{net}}$ ) atteint zéro. Ici, nous fixons la température ambiante ( $T_{\text{ambiante}}$ ) à 20 ° C et utilisons une transmittance atmosphérique typique à Stanford en hiver ([Fig. Supplémentaire 2](#)). Pour chaque émetteur, nous considérons deux coefficients de transfert de chaleur parasites:  $h = 8 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  représente une configuration expérimentale typique sans conception thermique sophistiquée, tandis que  $h = 0 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  représente un cas idéal avec une thermique parfaite isolation (voir [Note complémentaire 7](#) et [figure supplémentaire 5](#) pour des valeurs  $h$  intermédiaires plus).

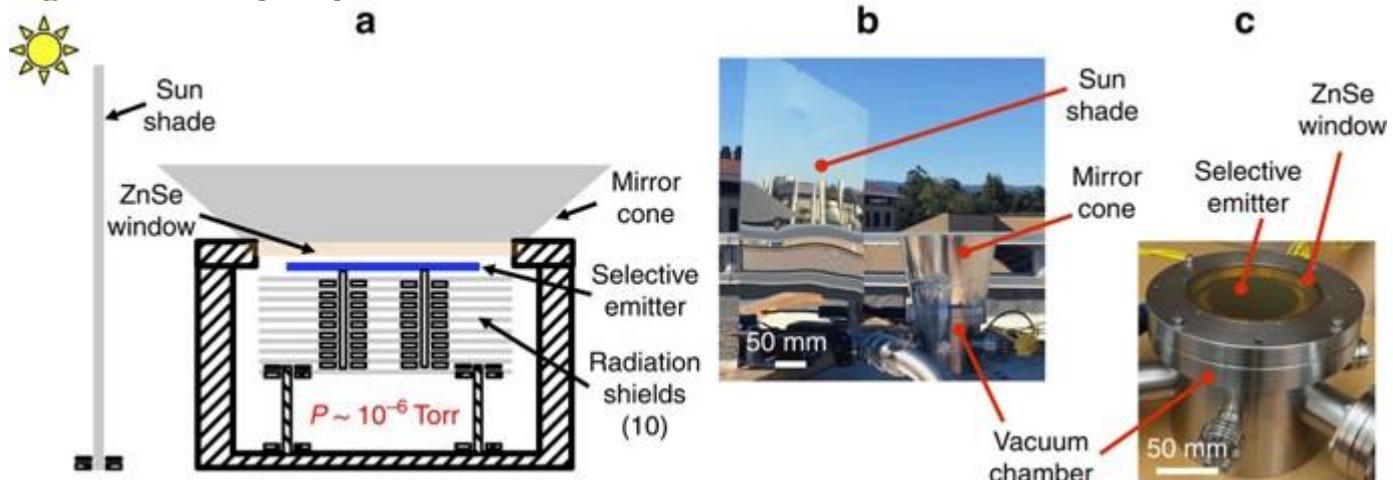
[La figure 1c](#) souligne deux caractéristiques clés. Tout d'abord, avec une importante perte de chaleur parasite ( $h = 8 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), la différence de performance entre le noir et l'émetteur sélectif est relativement faible. L'émetteur noir et l'émetteur sélectif presque idéal sont limités à une réduction de température  $|\Delta T| \sim 10^\circ \text{ C}$ . Deuxièmement, lorsque la perte de chaleur parasite est complètement éliminée ( $h = 0 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), il y a une très grande différence en termes de performances entre le noir et l'émetteur sélectif. Alors que la réduction de température de l'émetteur noir est limitée à  $|\Delta T| \sim 20^\circ \text{ C}$ , l'émetteur sélectif quasi idéal atteint une baisse de température beaucoup plus élevée  $|\Delta T| \sim 60^\circ \text{ C}$ . Ainsi, pour approcher la limite fondamentale du refroidissement radiatif, à la fois l'émetteur sélectif et la perte de chaleur parasite ultra-faible sont essentiels. Ces considérations, associées à la nécessité de supprimer l'irradiance solaire pendant la journée, motivent notre conception de l'appareil expérimental et de l'émetteur sélectif.

### Conception expérimentale

L'appareil expérimental se compose d'un émetteur sélectif entouré d'une chambre à vide protégée de la lumière directe du soleil ([Fig. 2a](#)). La clé ici est de s'assurer que l'émetteur sélectif est thermiquement découplé de l'air ambiant et du soleil, mais couplé à l'espace à travers la fenêtre de transparence atmosphérique. L'appareil présente donc les caractéristiques suivantes. Tout d'abord, les pertes de chaleur parasites, y compris la conduction et la convection de l'air, ainsi que le rayonnement et la conduction de l'arrière de l'émetteur sélectif, sont minimisées grâce à l'utilisation d'une chambre à vide (évacuée à une pression de  $10^{-6}$  Torr), qui renferme 10 écrans de rayonnement réfléchissant concentriques et 4 chevilles en céramique longues et creuses en plus de l'émetteur thermique. Ces chevilles fournissent un support mécanique, tout en minimisant la perte de

conduction de l'émetteur (pour les détails de conception thermique, voir la [note complémentaire 1](#)). Deuxièmement, la chambre à vide est équipée d'une fenêtre en ZnSe avec un revêtement antireflet double face. Une telle fenêtre a une transmittance élevée dans la plage de longueurs d'onde de la fenêtre de transparence atmosphérique, ce qui garantit un accès radiatif de l'émetteur sélectif à l'espace. Troisièmement, l'irradiance solaire directe et indirecte sur l'émetteur est minimisée par une combinaison d'une teinte placée verticalement sur le côté de la chambre et d'un cône miroir qui entoure la fenêtre ZnSe sur la chambre. L'abat-jour et le miroir conique garantissent que l'émetteur sélectif lui-même n'est exposé qu'à la lumière solaire diffuse pendant le temps, lorsque l'appareil est exposé à la lumière directe du soleil. Le cône limite également la plage angulaire de l'appareil autour de la direction zénithale où le ciel est le plus transparent,<sup>22</sup>. Une photographie de l'appareil expérimental placé sur le toit est présentée sur la [figure 2b](#). La [figure 2c](#) montre une photographie de certains détails de la chambre à vide, y compris l'émetteur sélectif et la fenêtre ZnSe.

**Figure 2: Concept expérimental.**



( A ) Représentation schématique du dispositif expérimental. La caractéristique clé est de minimiser les pertes de chaleur parasites de convection et de conduction d'air à l'aide d'un système de vide. Les écrans de rayonnement et les chevilles en céramique à long creux sont exploités pour réduire davantage les pertes de rayonnement et de conduction à l'arrière de l'émetteur sélectif. Le pare-soleil brillant et le miroir-cône sont utilisés pour minimiser l'irradiance solaire. ZnSe est sélectionné pour sa transparence dans la gamme de longueurs d'onde infrarouge moyen (ligne rouge sur la [figure 3b](#)). ( b ) Montage expérimental *in situ*. ( c ) Détails de la chambre à vide, y compris l'émetteur sélectif et la fenêtre ZnSe.

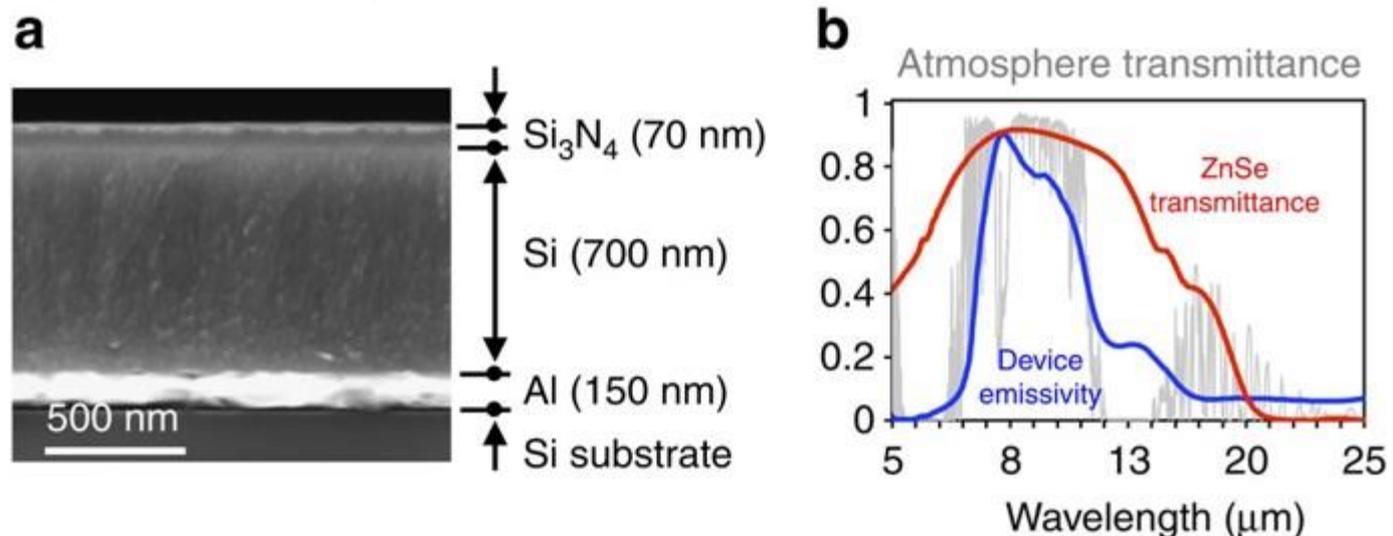
[Image en taille réelle](#)

La température de l'émetteur sélectif et de l'air ambiant est mesurée par des thermocouples de type K. Deux thermocouples sont ancrés avec du ciment conducteur à l'arrière de l'émetteur sélectif: l'un au centre et l'autre au bord pour

vérifier l'uniformité de la température. La non-uniformité mesurée ( $<0,3$  K) se situe bien dans la résolution du thermocouple.

La [figure 3a](#) montre une image au microscope électronique à balayage en coupe transversale de l'émetteur conçue pour approcher le spectre d'émetteur presque idéal comme le montre la [figure 1b](#). Il se compose de couches de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), de silicium amorphe (Si) et d'aluminium (Al), d'une épaisseur de 70, 700 et 150 nm, respectivement (pour plus de détails, voir la [note complémentaire 2](#)), au-dessus d'un Gaufrette en Si en dessous qui fournit un support mécanique. Ici, l'émission provient principalement de l'excitation phonon – polariton dans  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . De plus, l'épaisseur de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  est choisi pour être suffisamment petit pour réduire sensiblement les pertes radiatives indésirables aux longueurs d'onde en dehors de la fenêtre de transparence atmosphérique.

**Figure 3: Structure et spectre de l'émetteur sélectif.**



( a ) Image au microscope électronique à balayage transversal. ( b ) L'émissivité spectrale de l'émetteur sélectif (bleu), mesurée à l'aide de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et moyennée sur les deux polarisations, s'aligne très bien avec la transmittance atmosphérique (gris). La fenêtre ZnSe (rouge) a également confirmé sa transparence dans toute la fenêtre de transparence atmosphérique. Pour plus de clarté, ne montrez ici que les résultats dans la direction normale.

[Image en taille réelle](#)

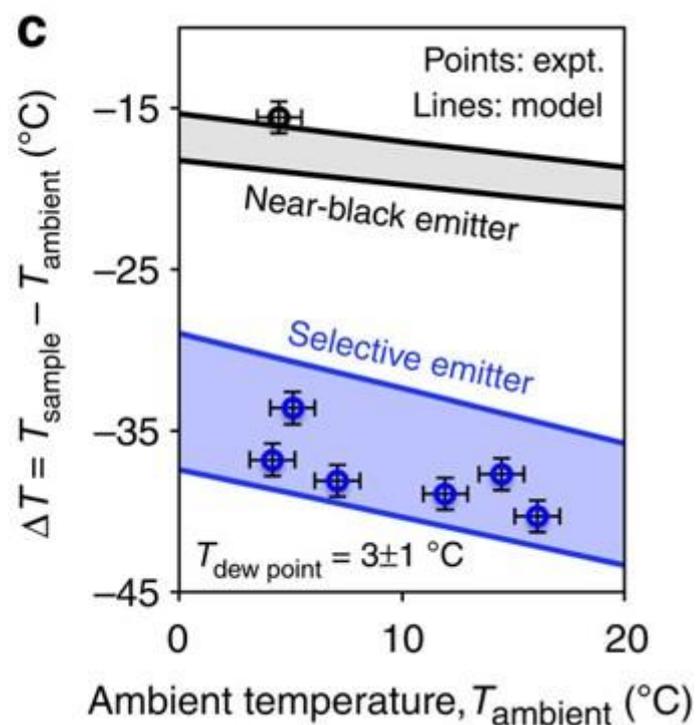
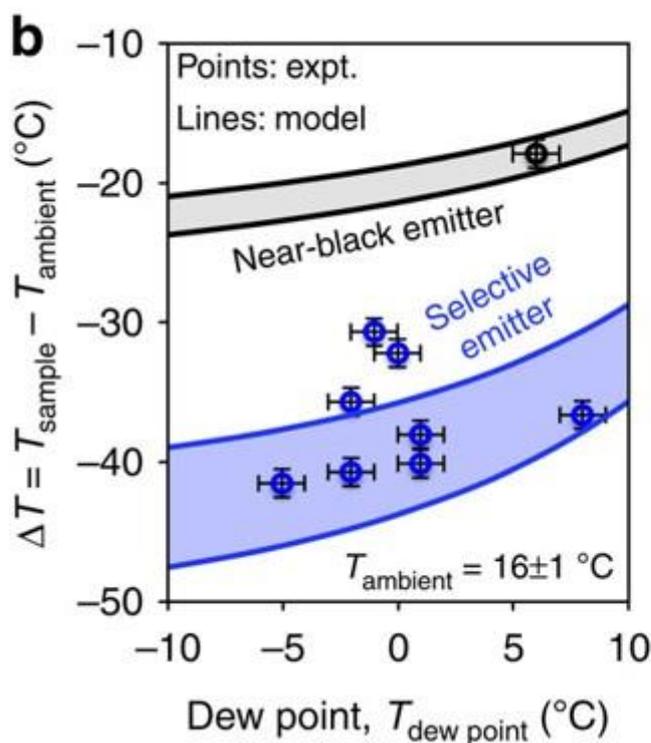
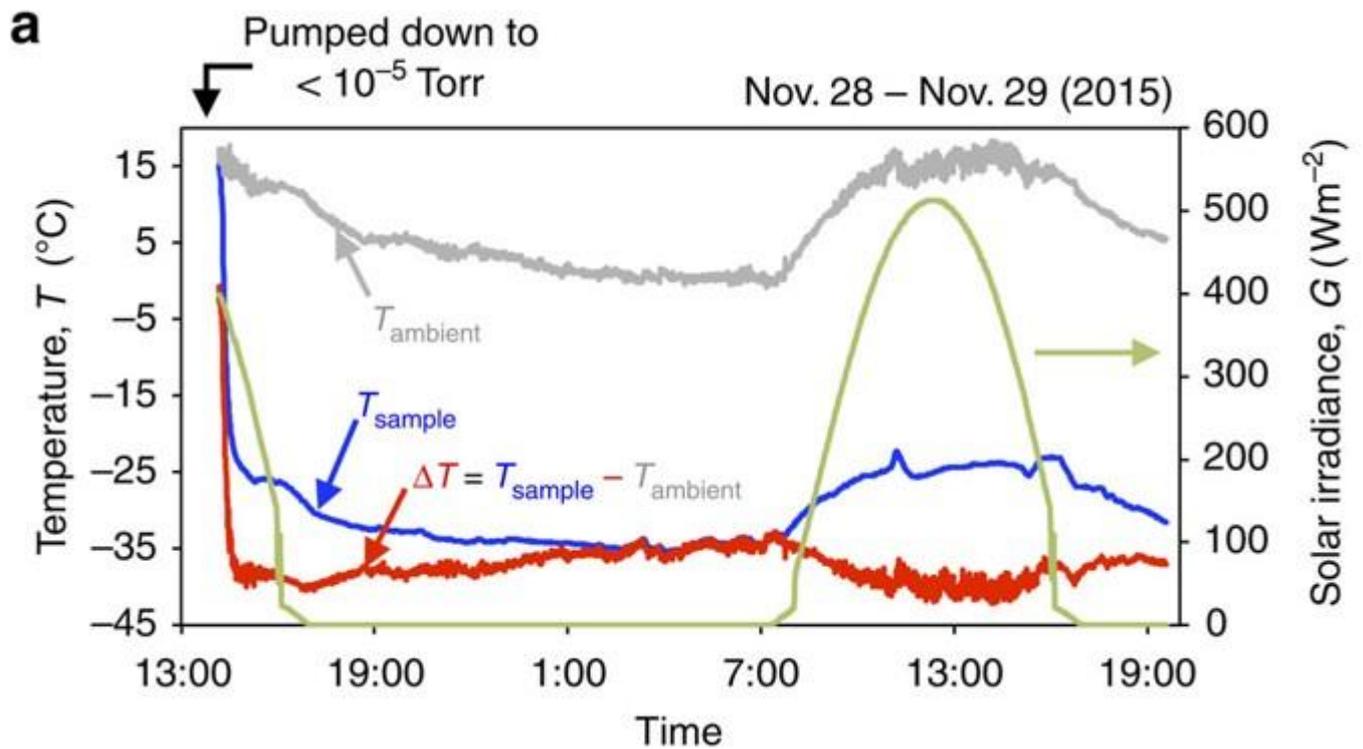
Le spectre d'émissivité de la structure est représenté sur la [figure 3b](#) (ligne bleue), ainsi que le spectre de transmission de la fenêtre ZnSe (rouge; voir la [note complémentaire 3](#)) de la chambre à vide, et une transmittance atmosphérique locale typique (gris). L'émissivité de l'émetteur et la transmission de la fenêtre ZnSe sont caractérisées à l'aide de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et

moyennées sur les deux polarisations. Nous avons effectué des caractérisations de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier sur l'émetteur sélectif sur les angles solides hémisphériques complets ( [Fig. Supplémentaire 1](#) ), mais pour plus de clarté, nous n'affichons ici que des données dans la direction normale. L'émissivité présente un large plateau qui correspond bien à la fenêtre de transparence atmosphérique. Au sein de ce plateau, la fenêtre ZnSe est également largement transparente. Par conséquent, la conception ici garantit que l'émetteur sélectif peut échanger efficacement la chaleur avec l'espace à travers la fenêtre ZnSe et l'atmosphère. En attendant, l'émetteur a peu d'émissivité en dehors de la fenêtre de transparence, ce qui minimise l'effet de chauffage du rayonnement descendant de l'atmosphère.

### Résultats expérimentaux

Nous avons effectué des mesures en exposant l'appareil expérimental à un ciel clair tout au long d'un cycle jour-nuit de 24 heures à Stanford, en Californie en hiver (voir la [note supplémentaire 9](#) et les [figures 7 et 8 supplémentaires](#) pour une expérience en été). Une mesure typique ( [Fig. 4a](#) ) montre la température de l'émetteur sélectif (bleu), l'air ambiant (gris), ainsi que leur différence (rouge). L'irradiance solaire (vert; axe droit) d'une journée claire typique en hiver est également mesurée pour référence. Quelques traits saillants peuvent être clairement identifiés à partir de la [Fig. 4a](#) . Tout d'abord, la température de l'émetteur sélectif diminue rapidement pour être de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  en dessous de l'air ambiant dans la demi-heure après le pompage de la chambre à vide à  $10^{-5}$  Torr. Deuxièmement, il suit de près l'évolution de la température de l'air ambiant dans les 24 h suivantes, avec une baisse de température moyenne par rapport à la température ambiante de  $37,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Enfin, la baisse de température maximale par rapport à la température ambiante ( $42,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) apparaît, lorsque l'appareil enfermant le refroidisseur est exposé à l'irradiation solaire maximale. Cette observation apparemment contre-intuitive indique l'efficacité du pare-soleil / cône de miroir pour bloquer la lumière du soleil et résulte du contraste élevé entre la température de l'air ambiant et le point de rosée, lorsque l'irradiance solaire atteint son apogée.

### Figure 4: Résultats expérimentaux.



( a ) Grande réduction de la température en dessous de la température ambiante grâce au refroidissement radiatif dans un cycle jour-nuit de 24 h. Après avoir pompé jusqu'à  $10^{-5}$  Torr, l'émetteur sélectif refroidit rapidement jusqu'à  $\sim 40$   $^{\circ}\text{C}$  en dessous de la température ambiante en une demi-heure. Un refroidissement maximal de  $42,2$   $^{\circ}\text{C}$  se synchronise avec le pic de l'irradiance solaire, confirmant la fonction du pare-soleil et du miroir-cône ( Fig.2 ), et mettant également en évidence le contraste élevé entre la température ambiante et le point de rosée pendant cette

période. ( **b** ) Comparaison avec les modèles théoriques: réduction de la température,  $\Delta T$ , en fonction du point de rosée, avec la température ambiante fixée à  $T_{\text{ambiante}} = 16 \pm 1 \text{ } ^\circ \text{C}$ . ( **c** )  $\Delta T$  en fonction de la température ambiante, le point de rosée étant fixé au  $T_{\text{point de rosée}} = 3 \pm 1 \text{ } ^\circ \text{C}$ . Les zones ombrées, grises pour l'émetteur proche du noir et bleues pour l'émetteur sélectif, représentent les incertitudes du modèle résultant des incertitudes dans l'estimation des pertes de chaleur parasites et de l'absorption de l'irradiance solaire diffuse (pour plus de détails, voir les [notes complémentaires 1 et 5](#) ). La barre d'erreur représente une estimation prudente de la sensibilité de nos thermocouples de type K et de l'incertitude liée à l'interpolation du point de rosée à partir d'une station météorologique à Stanford. Résultats en ( **b** , **c** ) soulignent une ligne directrice pour parvenir à une forte réduction de la température par refroidissement radiatif: émetteur sélectif à bas point de rosée et température ambiante élevée

[Image en taille réelle](#)

[La figure 4b, c](#) compare les résultats expérimentaux (points bleus) de l'émetteur sélectif aux prédictions théoriques (zone ombrée en bleu; pour plus de détails, voir les [notes supplémentaires 4 et 5](#) et la [figure supplémentaire 3](#) ). Une expérience de contrôle (points noirs) est également réalisée sur un émetteur proche du noir constitué d'une lame de silice fondue de 50  $\mu\text{m}$  recouverte sur sa face arrière de 150 nm de film d'aluminium. Les prédictions théoriques pour un tel émetteur proche du noir sont représentées par la zone grisée. Dans la prédiction théorique, nous avons lié les performances de l'un ou l'autre appareil à une perte de chaleur parasite maximale et minimale et à un rayonnement solaire diffus, estimé dans les [notes complémentaires 1 et 5](#) . Sur la [figure 4b, c](#), nous considérons la réduction de température en fonction du point de rosée (température de l'air ambiant), tout en maintenant la température de l'air ambiant (point de rosée) fixe. Notez que le point de rosée est obtenu à partir d'une station météo à Stanford ( <https://www.wunderground.com/us/ca/stanford> ). En général, l'expérience est en bon accord avec la théorie. Les quelques valeurs aberrantes de la [figure 4b](#) peuvent être liées à une couverture nuageuse mince invisible. Nous discutons plus en détail de l'effet des nuages dans la [note complémentaire 8](#) et la [figure supplémentaire 6](#) . Dans les deux [Fig.4b, c](#), nous voyons que l'émetteur sélectif est bien meilleur que l'émetteur proche du noir dans le but d'atteindre une température sous-ambiante importante sous une faible charge thermique. De même, pour la même plage de variation de la perte de chaleur parasite, la variation des performances de l'émetteur sélectif est beaucoup plus importante que celle de l'émetteur proche du noir. Ainsi, l'émetteur sélectif est plus sensible dans ses performances à la variation de la perte de chaleur parasite, confirmant la prédiction montrée sur la [figure 1c](#) .

[La figure 4b](#) montre que pour une température fixe de l'air ambiant, les performances de refroidissement s'améliorent à mesure que le point de rosée diminue. Un point de rosée bas se traduit par une fenêtre atmosphérique plus

transparente, et donc une meilleure performance de refroidissement radiatif. [La figure 4c](#) montre que pour un point de rosée fixe, la réduction de température augmente à mesure que la température ambiante augmente. En examinant le bilan énergétique de l'émetteur (équation 1), nous voyons que la température ambiante entre à la fois par le rayonnement atmosphérique descendant ( $Q_{atm}$ ) et la perte de chaleur parasite ( $Q_{parasitic}$ ). D'autre part, l'utilisation de l'émetteur sélectif et de la chambre à vide réduit considérablement ces deux termes et, par conséquent, la dépendance de la température à l'état stationnaire de l'échantillon à la température de l'air ambiant devient plus faible. Ainsi, bien que la température d'échantillon la plus basse se produise lorsque la température ambiante est basse, la réduction de température maximale se produit à la température ambiante maximale. Pour conclure de [la figure 4b, c](#), la réduction de température maximale est obtenue lorsque le point de rosée est bas et la température de l'air ambiant est élevée. Sur [la figure 4a](#), cela se produit près du point de l'irradiance solaire maximale.

## Discussion

---

En résumé, les expériences ici fournissent une performance record en refroidissement radiatif de jour comme de nuit. La température à l'état d'équilibre démontrée est bien en dessous du point de congélation même si l'appareil enfermant le refroidisseur est exposé à la lumière solaire maximale. Nos travaux démontrent la possibilité d'atteindre la limite fondamentale du refroidissement radiatif en combinant la conception photonique et thermique. D'un point de vue pratique, le refroidissement radiatif devient important dans un certain nombre de domaines, notamment le refroidissement passif des bâtiments [23](#), la récupération d'énergie renouvelable dans l'univers [24](#) et la réfrigération dans les régions arides [11](#). Nos travaux actuels indiquent une voie pour améliorer encore les systèmes de refroidissement radiatif, en particulier pour les applications où une forte réduction de la température est requise, comme la réfrigération dans la région aride [11](#). Pour les applications à forte charge thermique telles que le refroidissement passif du bâtiment [23](#), cependant, un émetteur sélectif différent visant à maximiser le flux de refroidissement doit être poursuivi (voir la [note complémentaire 6](#) et la [figure supplémentaire 4](#) pour plus de détails).

Nous terminons en commentant brièvement la perspective d'une mise à l'échelle du système actuel. Capteurs solaires à évacuation commerciale [25](#) utiliser le vide à un niveau comparable à ce que nous utilisons ici. Par conséquent, l'utilisation du vide lui-même n'est pas un problème pour la mise à l'échelle. D'un autre côté, nous reconnaissons plusieurs aspects du système actuel qui doivent être améliorés pour réaliser un déploiement à grande échelle de tels systèmes de refroidissement radiatifs hautes performances. Tout d'abord, pour obtenir un refroidissement radiatif, nous devons enfermer l'émetteur dans un matériau transparent à la gamme de longueurs d'onde infrarouge, tout en étant compatible avec un système à vide. Le matériau que nous utilisons, ZnSe, est trop coûteux pour ce sac à main. Pour un

déploiement à grande échelle, on peut envisager l'utilisation d'autres matériaux tels que Si ou Ge, qui sont transparents dans la gamme de longueurs d'onde de 8 à 13  $\mu\text{m}$ , comme fenêtre du système de vide. Il est important de noter que ces matériaux n'ont pas besoin d'être transparents dans la gamme de longueurs d'onde solaires. Seconde, il serait souhaitable de développer un schéma d'ombrage plus robuste autre que le pare-soleil / miroir-cône qui sont actuellement utilisés dans notre système. Une stratégie consiste à couvrir le système de vide avec des absorbeurs solaires transparents infrarouges pour absorber la lumière du soleil et dissiper la chaleur par convection naturelle. Nous envisageons de futurs efforts dans ces directions pour réaliser une mise en œuvre à grande échelle industrielle de nos travaux actuels.

#### Disponibilité des données

Les données qui soutiennent les résultats de cette étude sont disponibles sur demande auprès de l'auteur correspondant.

## Information additionnelle

---

**Comment citer cet article:** Chen, Z. *et al* . Refroidissement radiatif jusqu'à des températures très basses sous un cycle de 24 h jour-nuit. *Nat. Commun.* **7**, 13729 doi: 10.1038 / ncomms13729 (2016).

**Note de l'éditeur:** Springer Nature reste neutre en ce qui concerne les réclamations juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.

## Références

---

1. 1

---

Trombe, F. Perspectives sur l'utilisation des rayonnements solaires et terrestres dans certaines régions du monde. *Rev. Gen. Therm.* **6** , 1285-1314 (1967).

[Google Scholar](#)

---

2. 2

---

Castellanos, GS & Fournier, J. dans *International Congress, 'The Sun and the Service of Mankind'* Paper E20 (Paris, 1973).

---

3. 3

---

Catalanotti, S. et al. Le refroidissement radiatif de surfaces sélectives. *Sol. Energy* **17** , 83–89 (1975).

[LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)

---

4. 4

---

Bartoli, B. et al. Performances nocturnes et diurnes des radiateurs sélectifs. *Appl. Energy* **3** , 267-286 (1977).

[CAS Article Google Scholar](#)

---

5. 5

---

Harrison, AW & Walton, MR Refroidissement radiatif de la peinture blanche TiO<sub>2</sub>. *Sol. Energy* **20** , 185–188 (1978).

[LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)

---

6. 6

---

Granqvist, CG Refroidissement radiatif à basse température: considérations générales et application aux films de SiO à émission sélective. *J. Appl. Phys.* **52** , 4205–4220 (1981).

[CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)

---

7. 7

---

Berdahl, P. Refroidissement radiatif avec des couches de MgO et / ou LiF. *Appl. Opter.* **23** , 370–372 (1984).

[CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)

---

8. 8

---

Granqvist, CG Chauffage et refroidissement radiatifs avec des surfaces spectralement sélectives. *Appl. Opter.* **20** , 2606-2 615 (1981).

---

[\*\*CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar\*\*](#)

---

9. 9

---

Gentle, AR & Smith, GB Pompage de chaleur radiatif depuis la Terre à l'aide de nanoparticules résonantes de phonons de surface. *Nano Lett.* **10** , 373–379 (2010).

[\*\*CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar\*\*](#)

---

10. dix

---

Granqvist, CG & Hjortsberg, A. Lettre à l'éditeur. *Sol. Energy* **24** , 216-216 (1980).

[\*\*CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar\*\*](#)

---

11.11

---

Granqvist, CG & Hjortsberg, A. Surfaces de refroidissement radiatif: films de monoxyde de silicium sur aluminium. *Appl. Phys. Lett.* **36** , 139-141 (1980).

[\*\*CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar\*\*](#)

---

12.12

---

Zhu, L., Raman, AP & Fan, S. Refroidissement radiatif des absorbeurs solaires à l'aide d'un corps noir thermique à cristal photonique visiblement transparent. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **112** , 6–11 (2015).

[\*\*Article Google Scholar\*\*](#)

---

13.13

---

Shi, NN et al. Rester au frais: réflexion optique améliorée et dissipation de la chaleur radiative chez les fourmis d'argent sahariennes. *Science* **349** , 298-301 (2015).

---

**[CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)**

---

14.14

---

Hossain, MM, Jia, B. & Gu, M. Un émetteur de métamatériaux pour un refroidissement radiatif très efficace. *Adv. Opter. Mater.* **3** , 1047–1051 (2015).

**[CAS Article Google Scholar](#)**

---

15.15

---

Gentle, AR & Smith, GB Une surface de toit ouverte subambiente sous le soleil de la mi-été. *Adv. Sci.* **2** , 1500119 (2015).

**[Article Google Scholar](#)**

---

16.16

---

Bahadori, MN Systèmes de refroidissement passifs dans l'architecture iranienne. *Sci. Un m.* **238** , 144-154 (1978).

**[Article Google Scholar](#)**

---

17.17

---

Raman, AP, Anoma, MA, Zhu, L., Rephaeli, E. & Fan, S. Refroidissement radiatif passif en dessous de la température de l'air ambiant sous la lumière directe du soleil. *Nature* **515** , 540-544 (2014).

**[CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)**

---

18.18

---

Zhu, L., Raman, A., Wang, KX, Anoma, MA & Fan, S. Refroidissement radiatif des cellules solaires. *Optica* **1** , 32–38 (2014).

**[CAS Article Google Scholar](#)**

---

19.19

---

Zeyghami, M. & Khalili, F. Amélioration des performances des centrales solaires à concentration avancée refroidies à sec par refroidissement radiatif diurne. *Energy Convers. Manag.* **106** , 10-20 (2015).

[Article Google Scholar](#)

---

20.20

---

Youngquist, R. & Nurge, M. Atteindre des températures cryogéniques dans l'espace lointain en utilisant un nouveau revêtement. *Opter. Lett.* **41** , 1086-1089 (2016).

[CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)

---

21.21

---

Safi, TS & Munday, JN Amélioration des performances photovoltaïques grâce au refroidissement radiatif dans les environnements terrestres et extraterrestres. *Opter. Express* **23** , A1120 – A1128 (2015).

[CAS LES PUBLICITÉS Article Google Scholar](#)

---

22.22

---

Smith, GB Refroidissement radiatif amplifié via des combinaisons optimisées de géométrie d'ouverture et de profils d'émittance spectrale des surfaces et de l'atmosphère. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** , 1696-1701 (2009).

[CAS Article Google Scholar](#)

---

23.23

---

Advanced Research in Dry Cooling, Advanced Research Project Agency - Energy. Disponible sur <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/arid> (2014).

---

24.24

---

Byrnes, SJ, Blanchard, R. & Capasso, F. Récolter l'énergie renouvelable des émissions de l'infrarouge moyen de la Terre. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **111**, 3927–3932 (2014).

[CAS](#) [LES PUBLICITÉS](#) [Article](#) [Google Scholar](#)

---

25.25

---

Luque, A. & Hegedus, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* Wiley (2003).

---

[Télécharger les références](#)

## Remerciements

---

Ce travail a été soutenu par le Global Climate and Energy Project (GCEP) de l'Université de Stanford. Nous remercions le Dr Eli Goldstein d'avoir fourni des feuilles métalliques réfléchissantes pour créer le pare-soleil et le miroir.

## Informations sur l'auteur

---

### Notes de l'auteur

1. Zhen Chen et Linxiao Zhu: ces auteurs ont contribué à parts égales à ce travail

### Affiliations

1. **Département de génie électrique, Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, 94305, Californie, États-Unis**
  - Zhen Chen
  - , Aaswath Raman
  - & Shanhui Fan
2. **Département de physique appliquée, Université de Stanford, Stanford, 94305, Californie, États-Unis**
  - Linxiao Zhu

### Contributions

SF a conçu l'idée et supervisé la recherche. ZC a réalisé la conception thermique et LZ a réalisé la conception photonique. ZC et LZ ont effectué l'expérience et interprété les résultats. AR a fourni des conseils conceptuels. ZC et SF ont écrit le document. Tous les auteurs ont commenté le manuscrit.

auteur correspondant

Correspondance avec [Shanhui Fan](#) .

## Déclarations éthiques

---

Intérêts concurrents

Les auteurs déclarent une absence d'intérêts financiers en compétition.

## Information supplémentaire

---

[Information supplémentaire](#)

Figures supplémentaires, notes supplémentaires, références supplémentaires. (PDF 1708 ko)

[Fichier d'examen par les pairs \(PDF 279 ko\)](#)

## Droits et autorisations

---

Ce travail est autorisé sous une licence internationale Creative Commons Attribution 4.0. Les images ou tout autre matériel tiers dans cet article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire dans la ligne de crédit; si le matériel n'est pas inclus sous la licence Creative Commons, les utilisateurs devront obtenir l'autorisation du titulaire de la licence pour reproduire le matériel. Pour afficher une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

[Réimpressions et autorisations](#)

## À propos de cet article

---

Citez cet article

Chen, Z., Zhu, L., Raman, A. *et al.* Refroidissement radiatif jusqu'à des températures très basses sous un cycle de 24 h jour-nuit. *Nat Commun* **7**, 13729 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms13729>

[Télécharger la citation](#)

- Reçu 09 juin 2016
  - Accepté 28 octobre 2016
  - Publié 13 décembre 2016
  - EST CE QUE JE <https://doi.org/10.1038/ncomms13729>
- Partagez cet article

Toute personne avec laquelle vous partagez le lien suivant pourra lire ce contenu:

Obtenez un lien partageable

Fourni par l'initiative de partage de contenu Springer Nature SharedIt

Sujets

- [Nanoscience et technologie](#)
- [Optique et photonique](#)
- [Dispositifs photoniques](#)
- [Énergie renouvelable](#)

## Lectures complémentaires

---

- [Refroidissement radiatif auto-adaptatif et chauffage solaire basés sur une métasurface composée](#)
    - Wanlin Wang
    - , Zhongping Zhao
    - [\[...\]](#)
    - & Guo Ping Wang
- 

*Journal of Materials Chemistry C* (2020)

---

- [Deux larges bandes d'absorption dans des fenêtres transparentes sous atmosphère infrarouge par un réseau multicouche trapézoïdal](#)
    - Yulian Li
    - , Linzhi Li
    - [\[...\]](#)
    - & Bowen An
- 

*Optical Materials Express* (2020)

---

- [Emissive-energy harvesting using near-field heat transfer](#)
    - J J Fernández
- 

*Engineering Research Express* (2020)

---

- [Improving Heat Dissipation and Temperature Uniformity in Radiative Cooling Coating](#)
    - Hongkai Zhang
-

- & Desong Fan
- 

*Energy Technology* (2020)

---

- [Whitish daytime radiative cooling using diffuse reflection of non-resonant silica nanoshells](#)
- Takahiro Suichi
- , Atsushi Ishikawa
- [\[...\]](#)
- & Kenji Tsuruta

*Scientific Reports* (2020)

## Comments

---

By submitting a comment you agree to abide by our [Terms](#) and [Community Guidelines](#). If you find something abusive or that does not comply with our terms or guidelines please flag it as inappropriate.

## **Nature Communications**

ISSN 2041-1723 (online)

- [About us](#)
- [Press releases](#)
- [Press office](#)
- [Contact us](#)

•

•

•

### Discover content

- [Journals A-Z](#)
- [Articles by subject](#)
- [Nano](#)
- [Protocol Exchange](#)
- [Nature Index](#)

### Publish with us

- [Guide to Authors](#)
- [Guide to Referees](#)

- [Editorial policies](#)
- [Open access](#)
- [Reprints & permissions](#)

## Researcher services

- [Research data](#)
- [Language editing](#)
- [Scientific editing](#)
- [Nature Masterclasses](#)
- [Nature Research Academies](#)

## Libraries & institutions

- [Librarian service & tools](#)
- [Librarian portal](#)
- [Open research](#)

## Publicité et partenariats

- [La publicité](#)
- [Partenariats et services](#)
- [Kits médias](#)
- [Le contenu de marque](#)

## Développement de carrière

- [Carrières Nature](#)
- [La nature Conférences](#)
- [La nature événements](#)

## Sites Web régionaux

- [Nature Chine](#)
- [Nature Inde](#)
- [Nature Japon](#)
- [Nature Corée](#)
- [Nature Moyen-Orient](#)

© 2020 Springer Nature Limited

- [Politique de confidentialité](#)
- [Utilisation de cookies](#)
- [Gérer les cookies](#)
- [Mention légale](#)
- [Déclaration d'accessibilité](#)

- [termes et conditions](#)