



Des verres intelligents de plus en plus innovants

Une nouvelle réglementation thermique incite les industriels à concevoir des vitrages encore plus isolants. Tour d'horizon des dernières inventions.

Du simple au triple vitrage pour une isolation renforcée

Le verre n'est plus la passoire thermique longtemps décriée : les industriels, largement poussés par la réglementation, ont mis au point des vitrages très isolants. Ainsi, l'application depuis le 1^{er} janvier, à tous les bâtiments neufs, de la réglementation thermique 2012 (RT

2012), née de la loi Grenelle, oblige les constructions à limiter leur consommation moyenne d'énergie primaire à 50 kilowatt-heures par mètre carré par an (kWh/m²/an), contre 150 kWh/m²/an pour la réglementation 2005. Et impose un minimum de 17 % de surface vitrée par rapport à la surface habitable (soit 17 m² pour 100 m² habitables).

Cela afin de favoriser l'éclairage naturel et les apports d'énergie du soleil. Un tel objectif ne peut être tenu qu'avec des fenêtres offrant une très bonne isolation thermique et non avec un simple vitrage standard. Ce dernier, de 4 mm d'épaisseur, possède en effet une conduction thermique de près de 6 watts par mètre carré par kelvin (W/m²/K), ce qui

signifie que chaque mètre carré de cette vitre perd 6 watts lorsque la différence entre température extérieure et intérieure atteint un degré. En cas de grand froid, si la température est de -10 °C dehors et de 20 °C dedans, les pertes deviennent très importantes ! « C'est pourquoi l'isolation est la demande majeure de nos clients, et l'ob-

jectif principal de notre département de recherche et développement », observe Nelly Philipponnat, responsable du marketing de la branche européenne du groupe verrier japonais AGC.

Or améliorer l'isolation devient très difficile. Car les classiques doubles vitrages, constitués de deux lames de verre entre lesquelles est emprisonné un gaz (de l'air ou de l'argon) sur 10 à 20 mm d'épaisseur, ont déjà permis de diviser par deux ou trois la conduction thermique (voir le schéma p. 74). Les verriers ont même développé ces dernières années des doubles vitrages à isolation renforcée, pour lutter contre les pertes par rayonnement, c'est-à-dire de la lumière infrarouge – invisible mais porteuse de chaleur – qui traverse le verre. Le rayonnement infrarouge est en effet responsable de 70 % des pertes de chaleur sur un double vitrage classique. Les industriels ont donc ajouté une couche métallique, à base d'argent, située sur la face externe

de la vitre intérieure : celle-ci réfléchit les infrarouges vers la pièce. Et les résultats sont impressionnants : la conduction thermique descend à 1,1 W/m²/K, soit presque six fois moins que pour un simple vitrage.

Pour améliorer encore l'efficacité, le verrier britannique Pilkington a conçu un double vitrage dans lequel le gaz entre les vitres est remplacé par 0,2 mm de vide. L'isolation est alors bien meilleure, mais oblige à insérer tous les deux centimètres de minuscules « espaceurs », afin que les deux vitres ne se touchent pas. La conduction s'élève alors à 1,4 W/m²/K, proche de celle d'un double vitrage classique, mais avec un produit moins épais. « Il est conçu pour isoler très efficacement les bâtiments dont on ne peut pas augmenter l'épaisseur des fenêtres, par exemple pour les monuments historiques », indique Philippe Grell, directeur du marketing de Pilkington France. Une autre piste explorée consiste à passer

au... triple vitrage, avec plusieurs couches peu émissives, pour atteindre des conductions de 0,6 W/m²/K. Problème : plus un vitrage est isolant, plus le risque de condensation ou de givre augmente, car la vitre externe peut être plus froide que l'air ambiant. Plusieurs fabricants ont donc mis au point des verres anticondensation. « Pour éviter que la face externe ne descende trop en température, nous lui rajoutons une couche d'oxyde métallique, qui évite que le verre ne réémette de l'infrarouge et refroidisse », indique Nelly Philipponnat.

Des couches métalliques pour bloquer la chaleur

S'isoler contre le froid ne suffit pas. Il faut aussi lutter contre les fortes chaleurs, autrement dit éviter que l'effet de serre ne transforme les bâtiments en fournaise l'été. Les responsables sont connus : les rayons infrarouges, qui traversent les vitrages et viennent ●●●



Multi-usages

Si les grandes baies vitrées ont longtemps été des gouffres énergétiques, laissant échapper énormément de chaleur, ce n'est plus le cas aujourd'hui grâce aux doubles vitrages à isolation renforcée (à gauche), six fois plus isolants qu'un simple vitrage. De leur côté, les panneaux photovoltaïques (en haut) bénéficient de verres plus transparents, permettant de meilleurs rendements. Enfin, pour éviter la surchauffe en été, le verre devient contrôlable, passant du transparent au bleu, en appuyant simplement sur un bouton.



LEXIQUE

ENERGIE PRIMAIRE :

c'est l'énergie qu'il a fallu prélever dans la nature pour parvenir à produire l'énergie effectivement consommée. Ainsi, un kilowattheure d'électricité a nécessité 2,58 kilowattheures d'énergie primaire, compte tenu du rendement de production de l'électricité.

INFRAROUGES :

rayonnement électromagnétique invisible à l'œil nu, dont la longueur d'onde est plus élevée que celle de la lumière visible. A température ambiante, les objets émettent spontanément du rayonnement infrarouge.

PHOTOVOLTAÏQUE :

production d'électricité à partir du rayonnement du soleil.

●●● déposer dans les bâtiments la chaleur qu'ils transportent. Les arrêter c'est le but des verres à « contrôle solaire », surtout dans les régions méridionales, ou dans les bureaux, déjà chauffés par les équipements informatiques. Pour bloquer ce rayonnement infrarouge, on ajoute sur la face interne de la vitre externe du double vitrage une couche réfléchissante, à base d'argent comme pour les couches peu émissives (*lire plus haut*), mais de composition et d'épaisseur différentes. En effet, le rayonnement visé est différent : le soleil émet surtout de l'infrarouge « proche », de longueur d'onde comprise entre 0,78 micromètre (μm) et 1,4 μm environ, tandis que l'intérieur du bâtiment émet de l'infrarouge « lointain », autour de 10 μm . Certaines couches sont capables de bloquer les infrarouges proches, d'autres les infrarouges lointains. Selon l'usage de la fenêtre, on appose telle ou telle couche... ou les deux. Cependant, « en bloquant les infrarouges proches, on bloque aussi partiellement la lumière visible, c'est inévitable », note Philippe Grell. *Il faut donc choisir le vitrage en fonction de l'orientation du bâtiment : des verres bloquant les infrarouges proches pour les orientations ensoleillées, des verres plus transparents au nord.*

Puisque les besoins sont parfois contradictoires selon les saisons, une autre solution, plus innovante, consiste à moduler les apports solaires à volonté. La firme française Saint-Gobain a mis au point des vitrages « actifs », capables de passer d'un état transparent à un état bleu foncé, en passant par toutes les nuances de cette couleur, simplement en appuyant sur un bouton. Ce verre électrochrome, qui change de teinte sous l'effet d'un champ électrique, fonctionne comme une batterie. Il est recouvert d'un oxyde conducteur transparent, puis d'une électrode, d'un électrolyte, d'un matériau électrochrome (de l'oxyde de tungstène), et enfin d'une autre couche d'oxyde conducteur

transparent. Lorsqu'on applique une tension, l'oxyde de tungstène change de degré d'oxydation, et devient opaque, à la demande. Cet effet est progressif et réversible. « Nous cherchons également à développer des verres thermochromes, capables de s'opacifier lorsque la température croît », indique Emmanuel Valentin, chef du département couches minces chez Saint-Gobain Recherche. *L'avantage est qu'il n'est plus nécessaire de connecter électriquement le vitrage. C'est possible en appliquant une couche d'oxyde de vanadium sur le verre, mais la difficulté est de maîtriser la température de transition : une vitre qui deviendrait opaque à 80 °C ne présenterait pas trop d'intérêt, il faut que cela fonctionne autour de la température ambiante. Nous nous intéressons aussi aux verres photo-*

chromes, qui se modifient selon l'éclaircement, afin de moduler automatiquement la luminosité des pièces. »

Un film en polymère pour produire de l'électricité

Et si l'on transformait la lumière transitant par les fenêtres en électricité ? Des essais pourraient être menés avec des capteurs photovoltaïques en polymères semi-conducteurs, étudiés notamment à l'université de Californie à Los Angeles*. Principale difficulté : rendre ces capteurs assez transparents pour ne pas obstruer les fenêtres. Pour l'instant, les chercheurs ont utilisé un polymère sensible aux infrarouges proches et une électrode en composite de nanofils d'argent et de dioxyde de titane. Ce film obscurcit encore légèrement la pièce et la rentabilité obtenue par les cellules n'est que de 4 % (contre 15 à 20 % pour les

cellules photovoltaïques « classiques »). Mais, si les coûts de production parviennent à baisser, ce peu de rentabilité peut être compensé par le nombre de fenêtres par maison et appartement...

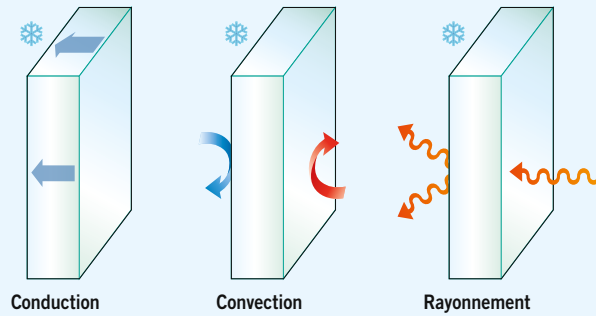
* <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/nn3029327>

Des verres plus transparents pour le photovoltaïque

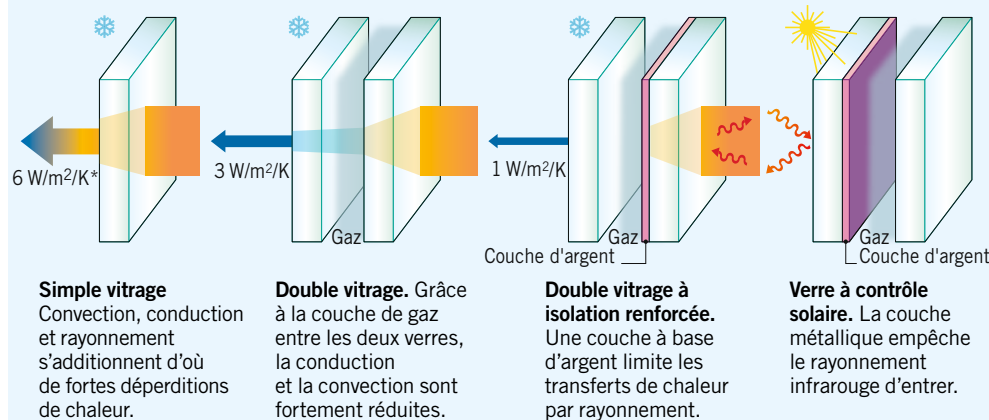
« Avec les réglementations successives, le photovoltaïque, aujourd'hui en crise, redeviendra bientôt incontournable ! », assure Nelly Philipponnat. Là encore, le verre jouera un rôle important en protégeant les panneaux, généralement installés sur les toits, contre les intempéries comme la grêle. Il devra aussi être le plus transparent possible afin que la cellule photovoltaïque capte le maximum de lumière. « Or, pour

3 manières de transporter la chaleur

Les échanges de chaleur, toujours du chaud vers le froid, se produisent de trois manières. La conduction est l'échange direct de l'énergie à travers le verre, elle ne dépend que de l'épaisseur de celui-ci. La convection est due aux mouvements d'un fluide (ici, de l'air) de part et d'autre du matériau. Enfin, le rayonnement infrarouge, invisible à l'œil nu, transporte lui aussi la chaleur, à travers les surfaces vitrées.



De plus en plus performants



Simple vitrage
Convection, conduction et rayonnement s'additionnent d'où de fortes déperditions de chaleur.

Double vitrage. Grâce à la couche de gaz entre les deux verres, la conduction et la convection sont fortement réduites.

Double vitrage à isolation renforcée. Une couche à base d'argent limite les transferts de chaleur par rayonnement.

Verre à contrôle solaire. La couche métallique empêche le rayonnement infrarouge d'entrer.

* Un vitrage est caractérisé par sa conductivité thermique. Plus elle est élevée, plus la chaleur s'échappe.

Des verres lumineux et modifiables à volonté

Envie d'une pièce transparente ou opaque à volonté, d'une étagère lumineuse bleue ou rouge, ou d'une cloison incluant une myriade de petites lumières ? Les verriers anticipent les demandes des designers. L'introduction de diodes électroluminescentes (LED) à l'intérieur même du vitrage, alimentées en électricité grâce à une couche conductrice transparente d'oxydes métalliques, offre des effets lumineux inédits. Saint-Gobain propose même des verres éclairants avec des diodes électroluminescentes organiques (OLED). Celles-ci ne sont plus des sources lumineuses ponctuelles, mais réparties dans l'ensemble du matériau, grâce une couche lumineuse prise en sandwich entre deux couches de verre. Il est même possible de modifier la fonction d'une pièce, grâce aux vitrages à cristaux liquides, capables de devenir opaques ou transparents à volonté en moins d'une seconde, simplement en appuyant sur un interrupteur.



Intimité préservée grâce aux vitrages à cristaux liquides, que l'on rend opaques ou transparents à volonté.

Le principe est le même que celui des écrans LCD : des cristaux liquides pris en sandwich entre deux couches de verre. Ils ne sont pas orientés, diffusent la lumière dans toutes les directions, et l'on obtient une vitre opaque. L'application d'une tension électrique aligne les cristaux liquides, qui deviennent transparents. L'effet est réversible à volonté. Une pièce commune peut ainsi devenir chambre à coucher, un bureau abriter une réunion confidentielle... Si, pour l'instant ces « verres à opacité commandée » sont blancs, rien n'empêche, dans le futur, qu'ils soient colorés. Enfin, un verre n'est beau que s'il est propre. Pilkington a ainsi mis au point un matériau autonettoyant, recouvert d'une couche de dioxyde de titane qui facilite les réactions de destruction des polluants organiques sous l'effet du soleil. En outre, les surfaces de ce verre sont conçues pour que l'eau s'étale et s'écoule facilement, entraînant avec elle les salissures.

améliorer la transparence, il faut éliminer les impuretés colorées, notamment le fer présent naturellement dans le sable et qui constitue la matière première principale du verre », explique Jean-Marc Flesselles, chef du service Elaboration des verres chez Saint-Gobain. Mais il est impossible de purifier totalement le verre, car ce serait bien trop coûteux. Seule solution : le fabriquer avec du sable le plus pur possible. « Il est de plus en plus difficile de trouver des sables purs, qui ont déjà été largement exploités. Nos équipes de géologues parcourent le monde pour les dénicher », indique Jean-Marc Flesselles. Les verres de qualité solaire contiennent ainsi 100 à 130 parties par million (ppm) de fer, contre 800 à 1000 ppm pour du verre ordinaire, et sont donc bien plus transparents. Pour optimiser

encore la transparence, il est possible de transformer l'ion ferreux (Fe^{2+}) en ion ferrique (Fe^{3+}), moins coloré, en ajoutant des oxydants dans le four où est fabriqué le verre, ou en le faisant fondre sous atmosphère oxydante. Les résultats sont notables, même si une transparence totale est impossible. « Un verre standard de 4 mm laisse passer 84 % de la lumière, contre 90 % pour un verre de qualité photovoltaïque », souligne Jean-Marc Flesselles. Mais les verriers ne se contentent pas de protéger le panneau photovoltaïque, ils interviennent même dans sa conception. Aujourd'hui, 90 % des panneaux photovoltaïques sont réalisés en silicium, mais Saint-Gobain mise sur une autre technologie, à base de couches minces de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIGS), où le verre joue

le rôle de substrat. « L'idée est de ne pas travailler avec des "wafers", ces galettes de silicium fragiles et difficiles à manipuler, indique Emmanuel Valentin. Le CIGS peut se déposer en couche mince de quelques micromètres, directement sur du verre, donc les coûts de fabrication des panneaux pourraient être fortement réduits, d'autant que les rendements théoriques sont meilleurs. Il reste néanmoins beaucoup de recherche à mener avant d'atteindre les mêmes performances que le silicium. »

Acoustique : une voiture aussi silencieuse qu'un murmure

Outre leur fonction isolante, les vitrages jouent aussi un rôle de réduction du bruit. Un polymère, le butyral de polyvinyle (PVB), est pris en sandwich entre deux feuilles de verre. Il

amortit la vibration du vitrage, donc sa transmission des bruits. « Au départ, ces vitrages étaient prévus pour les applications en sécurité : le PVB maintient le verre même quand il est cassé, empêchant les blessures, rappelle Philippe Grell. Avec plusieurs couches de PVB, le vitrage devient même efficace contre les effractions. Nous avons développé le PVB plus souple, qui amortit mieux les vibrations, offre ainsi de meilleurs résultats en acoustique. » Combiner des verres d'épaisseurs variées, vibrant à des fréquences différentes, permet également de limiter la propagation du son. Les meilleurs vitrages afficheraient une réduction acoustique de plus de 50 décibels, selon les fabricants. Le bruit d'une voiture roulant à 60 km/h dans la rue ressemble alors à un chuchotement.

Cécile Michaut