

Les vitrages : laissez entrer la lumière !

Ancienne élève de l'École Normale Supérieure de Cachan, ingénieure diplômée de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris (ENSCP), agrégée de sciences physiques option chimie et docteur en physico-chimie des polymères, Juliette Ruchmann est ingénieure de recherche à Saint-Gobain Recherche (Aubervilliers) (Encart : « De Louis XIV à nos jours : les origines du verrier Saint-Gobain ») où elle travaille sur de nouveaux vitrages aux propriétés étonnantes.

DE LOUIS XIV À NOS JOURS : LES ORIGINES DU VERRIER SAINT-GOBAIN

Saint-Gobain est riche d'une longue histoire internationale qui commence en France en 1665, avec la création de la Manufacture des Glaces de Miroirs par le roi Louis XIV et se poursuit par la fusion avec Pont-à-Mousson en 1970, point de départ des différentes évolutions qui configurent le Groupe aujourd'hui, avec un chiffre d'affaires de 37,8 milliards d'euros en 2009, une présence dans 64 pays et plus de 190 000 salariés.

Aujourd'hui, Saint-Gobain, devenu leader mondial de l'habitat, est un pionnier de « l'habitat durable » innovant constamment dans le domaine des matériaux et particulièrement des vitrages.

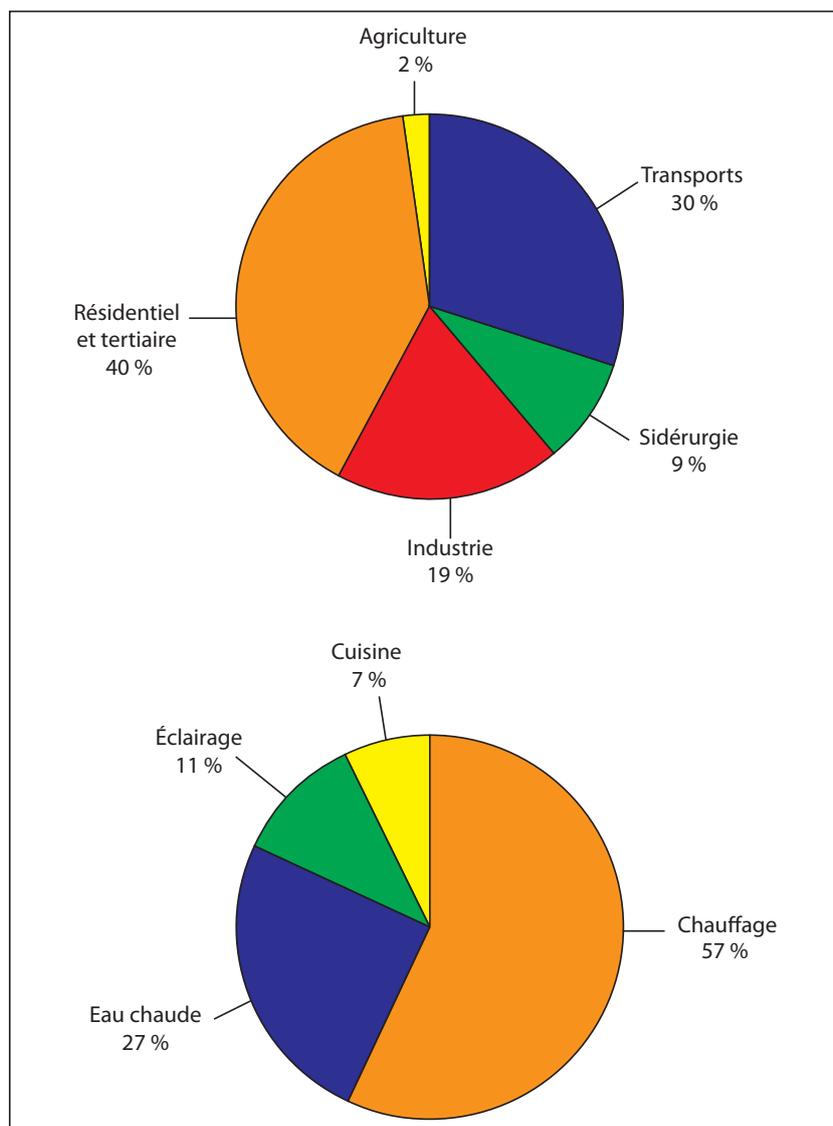


Figure 1

Les bâtiments sont les plus gros consommateurs d'énergie en France, le chauffage constitue le pôle de consommation le plus important.

1 Le « matériau-verre », réponse à un besoin d'économie d'énergie

1.1. Les multiples fonctions du verre

Le « matériau verre » dans son utilisation en tant que vitrage dans l'habitat s'est aujourd'hui éloigné du verre brut. Modifié par des dépôts de couches minces diverses, choisies pour répondre à des cahiers des charges fonctionnels, il a évolué en matériau de haute technologie. Si l'on peut adapter l'esthétique du verre en le colorant ou en lui appliquant un traitement antireflet pour réaliser des vitrines commerciales attrayantes, on peut aussi adapter le verre aux applications

photovoltaïques en le rendant conducteur de l'électricité (voir le *Chapitre de D. Lincot*), proposer un matériau-verre pour les nouveaux types d'écrans réclamés par les progrès de la communication, le rendre autonettoyant, améliorer ses propriétés mécaniques, le rendre résistant aux rayures, ou encore améliorer ses performances thermiques (vitrages à isolation thermique renforcée, vitrages de contrôle solaire)... La liste peut être longue !

1.2. L'isolation des bâtiments, clé de l'économie d'énergie

Le bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie finale en France (*Figure 1*) avec 40 % du total (voir aussi les *Chapitres d'A. Ehlacher* et de *D. Quénard*), ainsi qu'il ressort des analyses de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Ceci fixe à la profession l'ardent objectif de réduire les pertes thermiques associées au contrôle de la température des bâtiments ; dans cette course à l'amélioration de l'isolation thermique et grâce aux avancées technologiques récentes, l'utilisation du matériau verre représente un atout majeur (*Figure 2*).

2 Les propriétés thermiques du verre

Il y a lieu de revenir aux fondamentaux de la physique du transfert thermique (*Figure 3*). Soit une paroi maintenue à deux températures différentes, T_1 à l'intérieur, T_2 à l'extérieur. La thermodynamique stipule

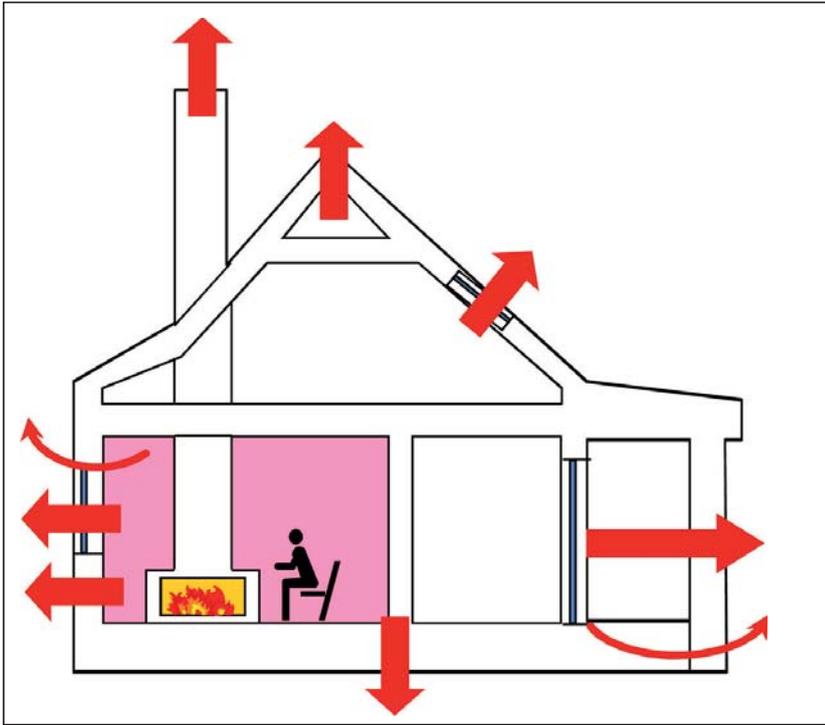


Figure 2

Schéma thermique d'une habitation.
Les pertes thermiques dans l'habitat (par chauffage) viennent des : portes et fenêtres (13 %), murs (16 %), toits (30 %), sols (16 %), ventilation (20 %), ponts thermiques (5 %).

qu'en l'absence de couplage extérieur, ces deux températures vont évoluer jusqu'à devenir égales (équilibre thermique) par transfert de chaleur du point chaud vers le point froid. La facilité avec laquelle ce transfert s'effectue est quantifiée par le coefficient de transfert thermique U, qui s'exprime en watt par mètre carré et par Kelvin ($W/m^2/K$) et est calculé selon la norme EN 673. Les phénomènes physiques à la base du transfert thermique sont :

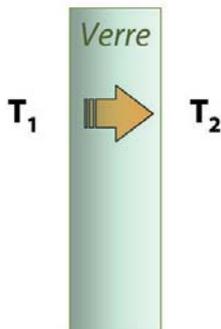
- la **conduction**, qui dépend de la conductivité du matériau ($1,4 W/m^2/K$ pour le verre et $0,03 W/m^2/K$ pour l'air) ;
- la **convection**, qui est liée au transport de matière. Sur une surface vitrée, la température n'est pas forcément uniforme et le milieu en contact avec les surfaces - l'air, l'eau, etc. - se déplace ; il peut ainsi « emporter » de la chaleur et participe donc au transfert thermique ;
- le **rayonnement** (Figures 3 et 4). Le spectre solaire irradié

Figure 3

Les trois modes de transfert thermique à travers une paroi en verre : par conduction, par convection et par rayonnement.

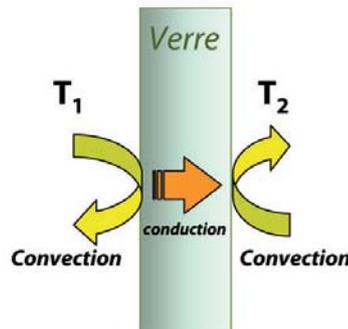
Conduction

- transfert d'énergie de proche en proche
- sans transport de matière
- provoqué par ΔT_{12}



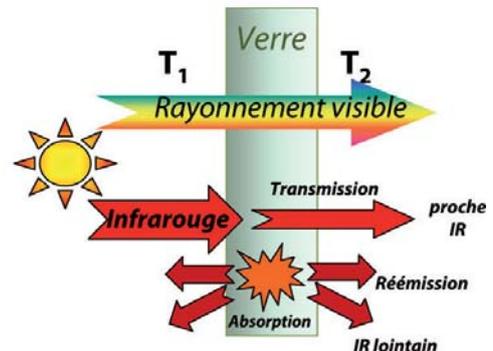
Convection

- conduction
- +
- transport de matière



Rayonnement

- émission et réception d'ondes électromagnétiques
- rayonnement du corps noir



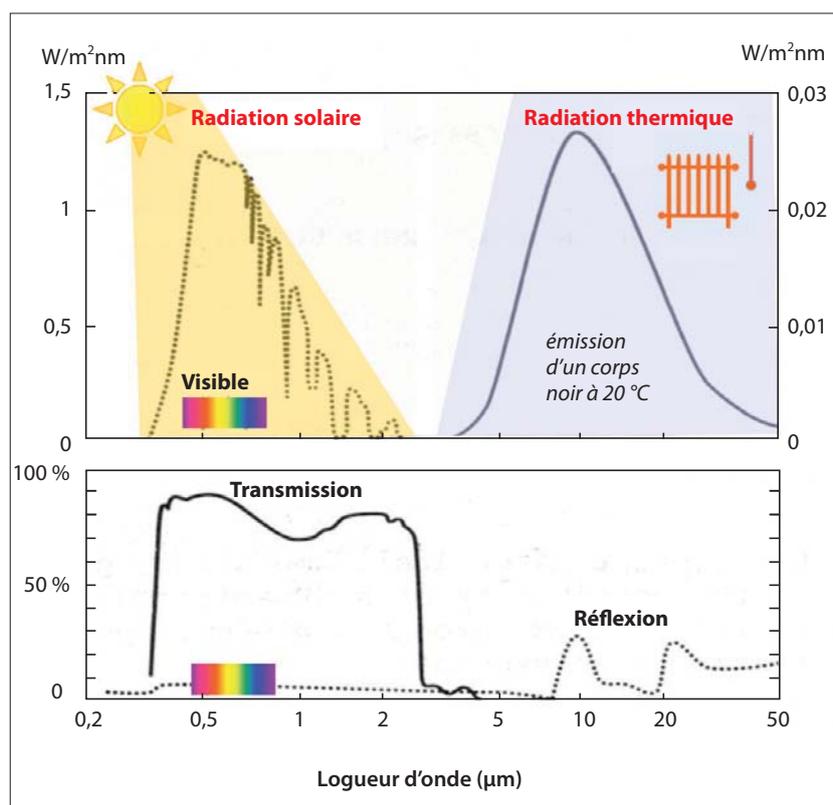


Figure 4

Spectres de transmission et de réflexion du verre en fonction de la longueur d'onde.

Le verre est transparent dans le visible et dans le proche infrarouge. Par contre, il absorbe dans l'infrarouge lointain (longueur d'onde $> 5 \mu\text{m}$) dont il est mauvais réflecteur : il réémet ces rayons et transfère de la chaleur.

dans le visible, dans l'ultraviolet (UV) aux plus courtes longueurs d'onde et dans l'infrarouge (IR) aux plus grandes longueurs d'onde (voir aussi le [Chapitre de M.J. Ledoux, Figure 3](#)). Plus précisément, ce spectre contient 5 % d'énergie dans l'ultraviolet (longueur d'onde inférieure à $0,4 \mu\text{m}$), 50 % de son énergie dans le spectre visible (longueur d'onde entre $0,4$ et $0,8 \mu\text{m}$) et 45 % dans l'infrarouge. Dans ce dernier domaine, on distingue le proche infrarouge, juste à côté du visible, et l'infrarouge lointain. Les corps émettent tous des radiations : aux températures proches de l'ambiante, ils émettent principalement dans l'infrarouge lointain, appelé aussi, pour cette raison, infrarouge thermique.

Transparent et peu réfléchissant sur tout le spectre solaire, le verre est capable de transmettre la lumière solaire

du spectre visible et du proche infrarouge. En revanche, il absorbe pratiquement toute la lumière de l'infrarouge thermique comme schématisé sur la [Figure 4](#). Ainsi le rayonnement thermique qui provient de l'intérieur chauffé d'une pièce est-il absorbé par le verre puis réémis des deux côtés ; le bilan thermique global est un transfert de chaleur à travers le verre, de l'intérieur vers l'extérieur, entraînant une diminution de la température de la pièce.

3 Du simple au triple vitrage

Les valeurs des coefficients de transfert thermique et donc les ordres de grandeur des contributions des trois phénomènes physiques impliqués (conduction, convection, rayonnement) sont bien documentés et permettent le dimensionnement du vitrage en fonction des objectifs à atteindre.

Dans le cas d'un simple vitrage, le transfert thermique se fait essentiellement par conduction. Pour un verre de 4 mm d'épaisseur, le coefficient U est environ $5,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$, et le transfert de chaleur à travers le verre est aisé. Augmenter l'épaisseur du verre a peu d'effet, puisque la valeur de U diminue seulement de $5,8$ à $5,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ en passant de 4 mm à 19 mm : pour obtenir un vitrage suffisamment isolant (U proche de $1 \text{ W/m}^2/\text{K}$), il faudrait lui donner une épaisseur de 70 cm ([Figure 5](#)) !

L'introduction entre deux plaques de verre (double vitrage) d'une lame d'un gaz (air ou argon) à très faible

conductivité thermique permet une très forte réduction des pertes par conduction (voir aussi le **Chapitre de J.-C. Bernier**). Dans le cas d'argon à pression ordinaire (conductivité de $0,025 \text{ W/m}^2/\text{K}$), le gain est ainsi d'un facteur 2 ; la perte résiduelle est alors due au rayonnement.

Un perfectionnement supplémentaire consistant à ajouter une couche mince sur la surface du verre pour réfléchir l'infrarouge lointain (**Figure 6**) donne le matériau dit « verre de haute technologie ». Sur une plaque de verre « float »¹ classique, on dépose une couche dite « basse émissive » qui laisse passer le spectre visible, préservant la propriété de transparence, mais réfléchit l'infrarouge thermique avec une grande efficacité. Le verre absorbe toujours le rayonnement thermique, mais ne le réémet plus vers l'extérieur mais vers l'intérieur sous l'effet de la couche « basse émissive » qui le réfléchit. Le transfert thermique par rayonnement est ainsi considérablement atténué avec des valeurs de U de l'ordre de $1,1 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Le progrès par rapport au double vitrage – pour ne pas men-

1. Le procédé du Float a été établi par le groupe Pilkington en 1952 et instaure désormais la norme internationale pour la production du verre plat de haute qualité. Un mélange de verre recyclé (calcin), de sable de silice, de chaux, de soude et d'oxydes est versé sur un bain d'étain à sa sortie du four. Le verre flotte sur l'étain, ce qui lui confère une surface très lisse et des qualités optiques exceptionnelles. La vitesse de la coulée est le paramètre qui détermine l'épaisseur du verre.

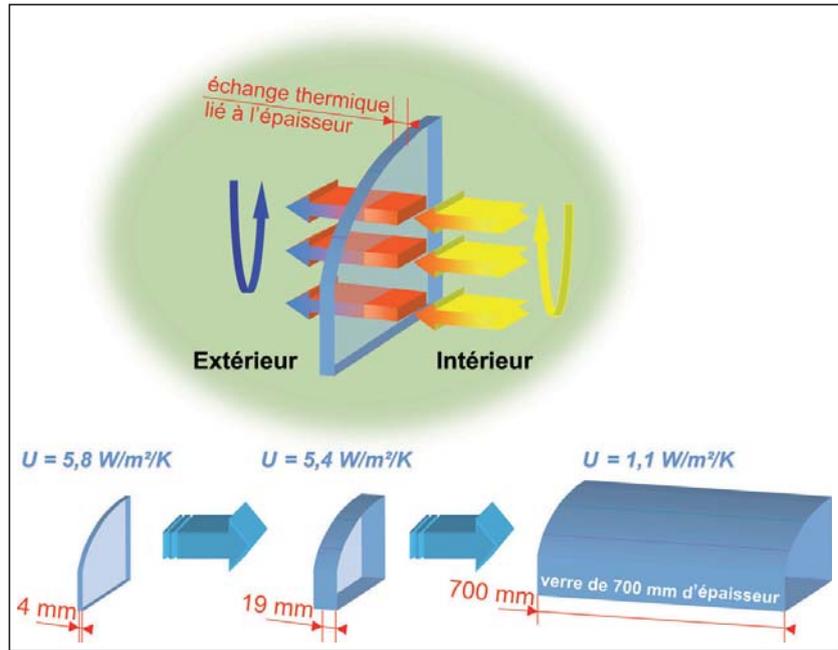
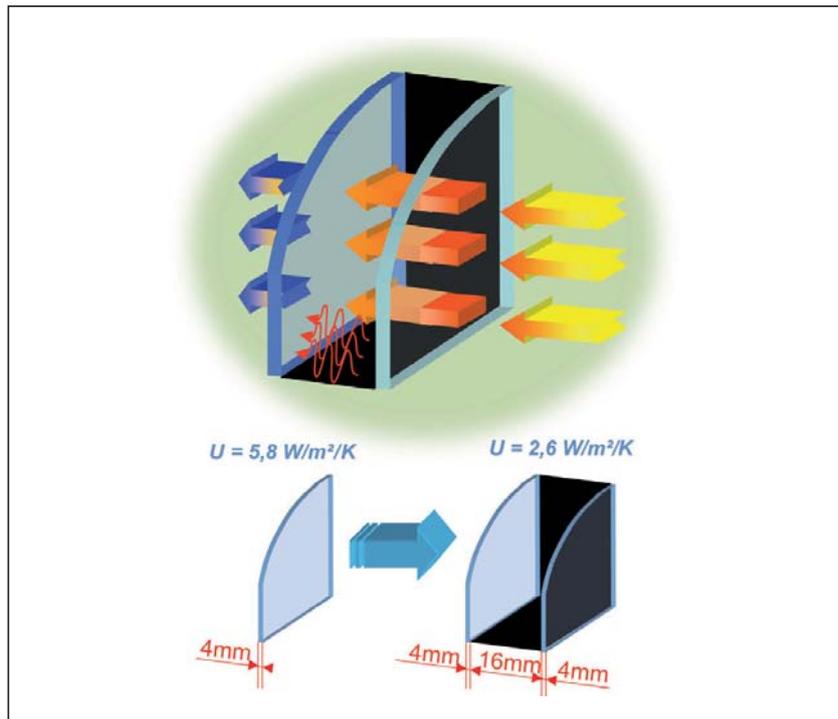


Figure 5

Schéma du fonctionnement thermique d'un simple vitrage. L'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur étant lié principalement à la conduction dans le verre, l'isolation ne dépend alors que de son épaisseur. Pour commencer à avoir une bonne isolation, il faudrait un verre épais de 70 cm !

Figure 6

Principe de l'isolation thermique par double vitrage. L'efficacité de l'isolation dépend de la nature et de l'épaisseur du volume de gaz. On arrive ainsi à diviser par deux l'énergie thermique échangée par rapport à un simple vitrage.



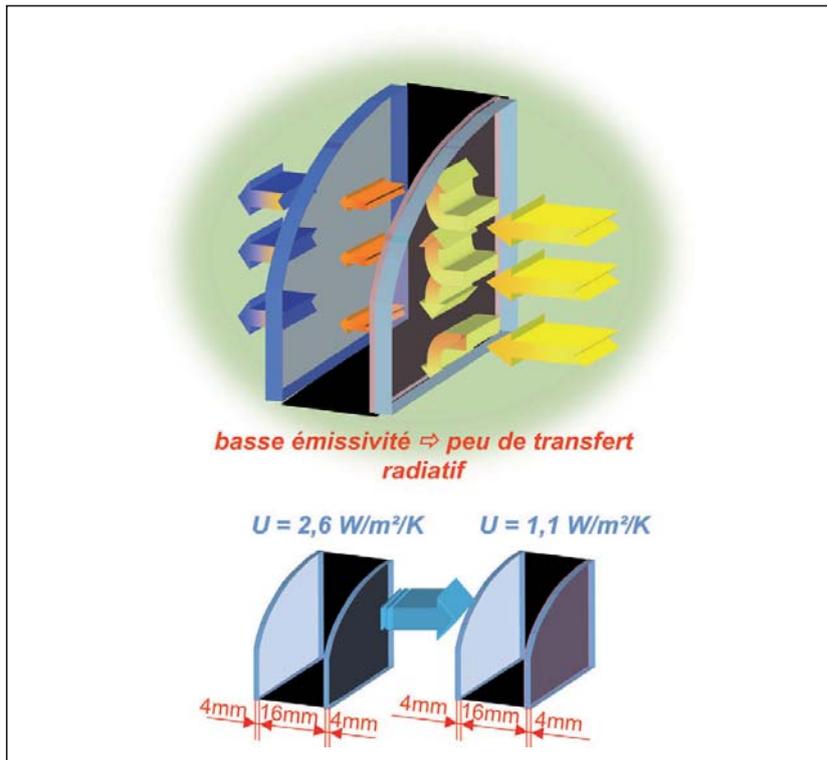


Figure 7

Principe de l'isolation thermique par vitrage « bas émissif ». Dans un double vitrage classique, le transfert thermique résiduel est, pour 70 %, dû au rayonnement. Si l'on ajoute une couche basse émissive qui bloque la transmission de l'infrarouge lointain (peu de transmission + réflexion élevée), le transfert thermique est réduit d'un facteur trois par rapport à un double vitrage classique et d'un facteur six par rapport à un simple vitrage.

tionner le simple vitrage – est spectaculaire (Figure 7).

Des progrès de performances au-delà de celles du double vitrage bas émissif sont obtenus de plusieurs façons :

- en utilisant du triple vitrage, c'est-à-dire en répétant ce qui a été fait pour le double vitrage, la présence de deux lames d'air au lieu d'une seule diminuant encore la conduction ;

- en utilisant le vitrage sous vide – le vide étant le meilleur isolant possible. La limitation d'usage provient de problèmes technologiques, la cavité sous vide devant être parfaitement étanche.

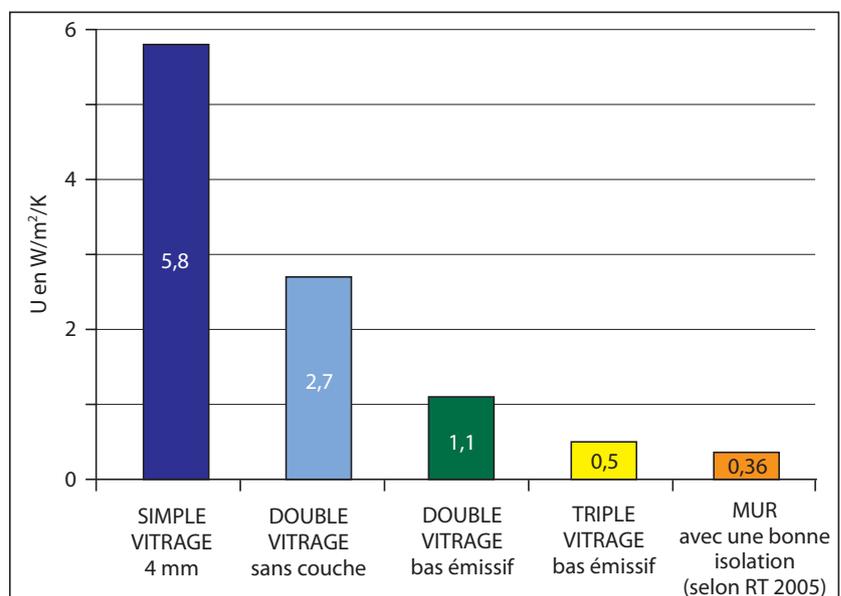
En résumé, en passant du simple vitrage au double vitrage puis au double vitrage bas émissif, le gain est tel qu'on égale presque avec le verre la performance d'isolation d'un mur (Figure 8).

4 Gagner en énergie en contrôlant la transmission de la lumière

Si seul comptait le critère d'isolation thermique, la « maison basse consommation » se concevrait comme une habitation à très peu d'ouvertures, très peu de fenêtres et donc très peu de verre. Mais, à côté des « pertes thermiques », il y a lieu de considérer les « gains thermiques » qui correspondent à la quantité d'énergie apportée par la lumière et le soleil. Les pertes sont quantifiées par le paramètre U (voir le

Figure 8

Technologies successives pour l'isolation thermique.



paragraphe 2) et les gains par le facteur solaire² g. Le bilan énergétique global, tenant compte à la fois des pertes et des gains, peut être rendu positif ; un vitrage serait alors plus performant qu'un mur (Figure 9).

Un calcul a été effectué sur un bâtiment localisé à Stuttgart (Allemagne). Il montre que même avec l'emploi du triple vitrage, les pertes thermiques sont beaucoup plus importantes *via* les vitres que *via* les murs. En revanche, avec un facteur solaire g égal à zéro pour le mur (aucun apport de chaleur par le soleil) et à 60 % pour les vitres, un gain très important est mis en évidence sur la face sud (très ensoleillée) et un gain moins important mais encore positif pour la face nord. Le bilan énergétique est positif pour les façades sud, est et ouest, faiblement négatif pour la façade nord et confirme que le bilan global peut être meilleur pour le vitrage que pour le mur (Figure 10).

En conclusion : mettez des vitrages, laissez entrer la lumière dans vos bâtiments et faites du même coup des gains d'énergie de chauffage !

Autre exemple : sur une maison située à Vienne (Autriche), où l'énergie surfacique nécessaire au chauffage était de 11 kWh/m² par an pour une surface de fenêtres de 24 %, on a proposé d'agrandir la surface vitrée au sud plus qu'au nord, à l'est et à l'ouest, la portant à 49 % au total. La consommation électrique et la consommation

2. Le facteur solaire g d'un vitrage est le rapport entre l'énergie totale entrant à travers ce vitrage et l'énergie solaire incidente.



Figure 9

Schéma des échanges thermiques à travers les parois servant de base au calcul du bilan thermique.

g est le facteur solaire, qui correspond à l'énergie solaire transférée à travers le vitrage.

U est l'énergie thermique transférée à travers le vitrage.

Figure 10

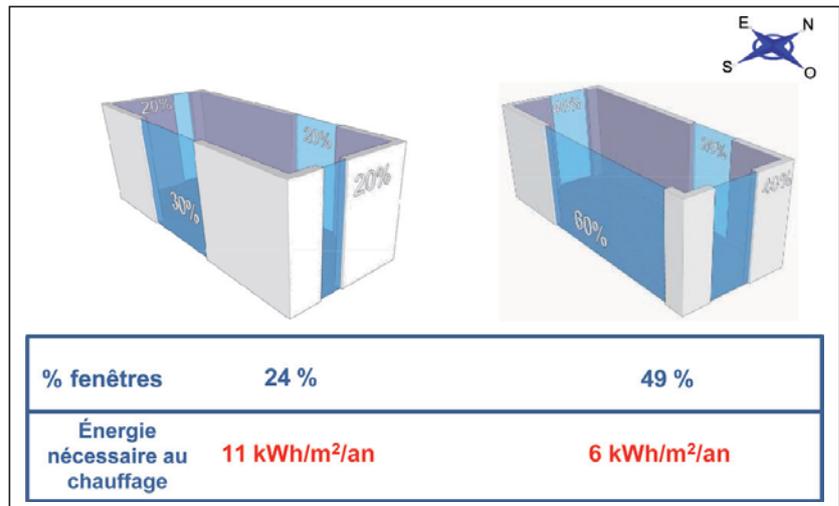
Bilan énergétique réalisé sur un bâtiment à Stuttgart.

Un gain thermique est mis en évidence sur les faces sud et est/ouest, qui reçoivent beaucoup de rayonnements solaires, notamment par les vitres !

| | | | | |
|--------------------------------|------|------|-----------------|------------|
| Pertes U (W/m ² /K) | 0,12 | 0,71 | | |
| Gains g (%) | 0 | 60 | | |
| kWh/m ² | | | | |
| | Mur | Sud | Vitre Est/Ouest | Vitre Nord |
| Pertes | - 10 | - 56 | - 56 | - 56 |
| Gains | 0 | 115 | 69 | 49 |
| Bilan | - 10 | 59 | 13 | - 7 |

Figure 11

Bilan énergétique simulé sur une maison à Vienne. En augmentant la surface vitrée au sud, on augmente les économies en chauffage.



d'énergie nécessaires au chauffage (6 kWh/m²/an) ont été sensiblement diminuées, et le confort de la construction amélioré (Figure 11).

5 Le vitrage de demain pour le confort et l'économie d'énergie

5.1. Bloquer le proche infrarouge par des vitres réfléchissantes

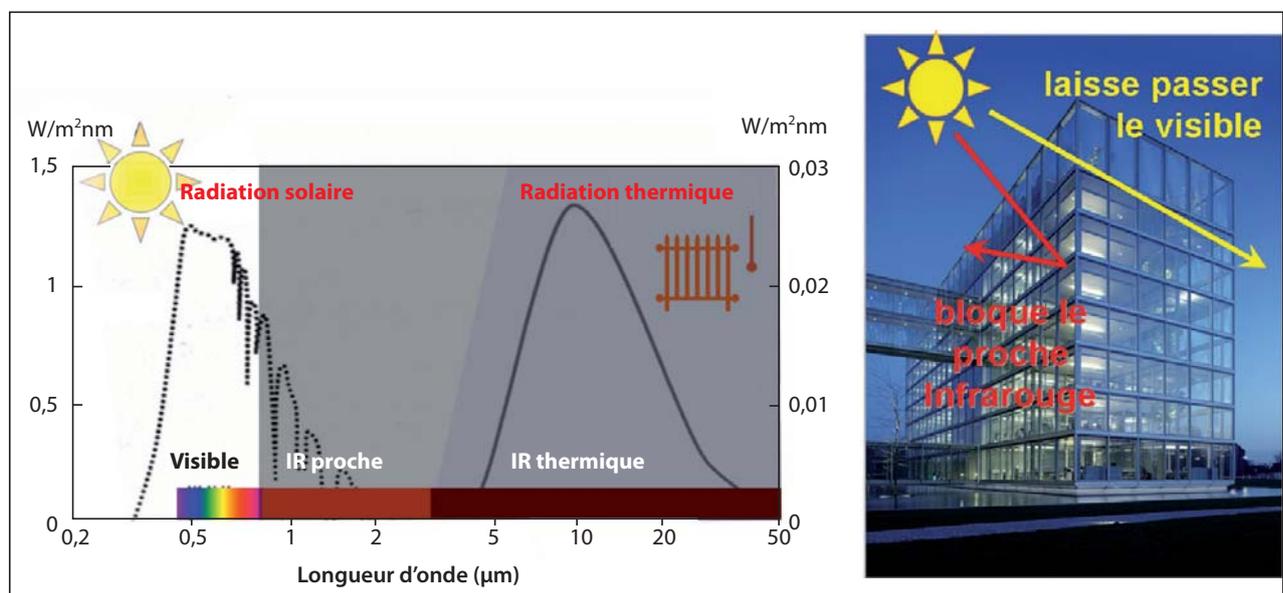
La construction d'immeubles d'habitation n'est pas la seule activité du bâtiment ; il faut aussi considérer les bâtiments conçus pour les activités tertiaires qui posent au construc-

teur un problème supplémentaire, celui de la climatisation des grands volumes.

L'utilisation de panneaux vitrés pour clore ces bâtiments paraît de prime abord comme inappropriée, le soleil apportant un excès de chaleur difficile à réguler lorsqu'il frappe les façades. Cependant, il est possible de concevoir des « verres techniques » capables de contourner la difficulté. Pour ce faire, il faut contrôler l'apport direct d'énergie par les radiations du soleil, c'est-à-dire bloquer non seulement l'infrarouge thermique, mais aussi le proche infrarouge, ne laissant passer que la lumière

Figure 12

Blocage du proche infrarouge. Des vitres qui réfléchissent le proche infrarouge pour ne pas trop chauffer dans les bâtiments.



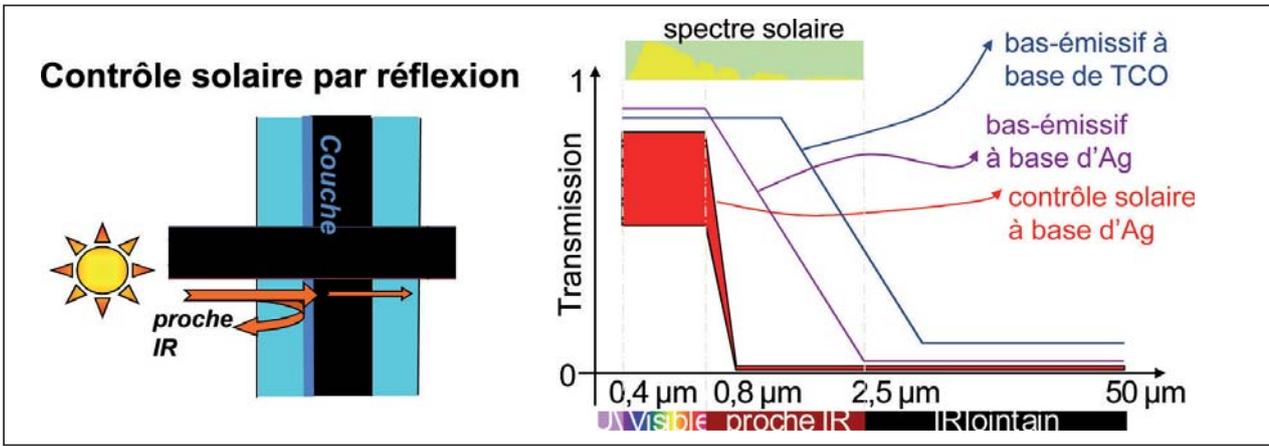


Figure 13

Exemples d'influence des traitements sur la transmission des verres.

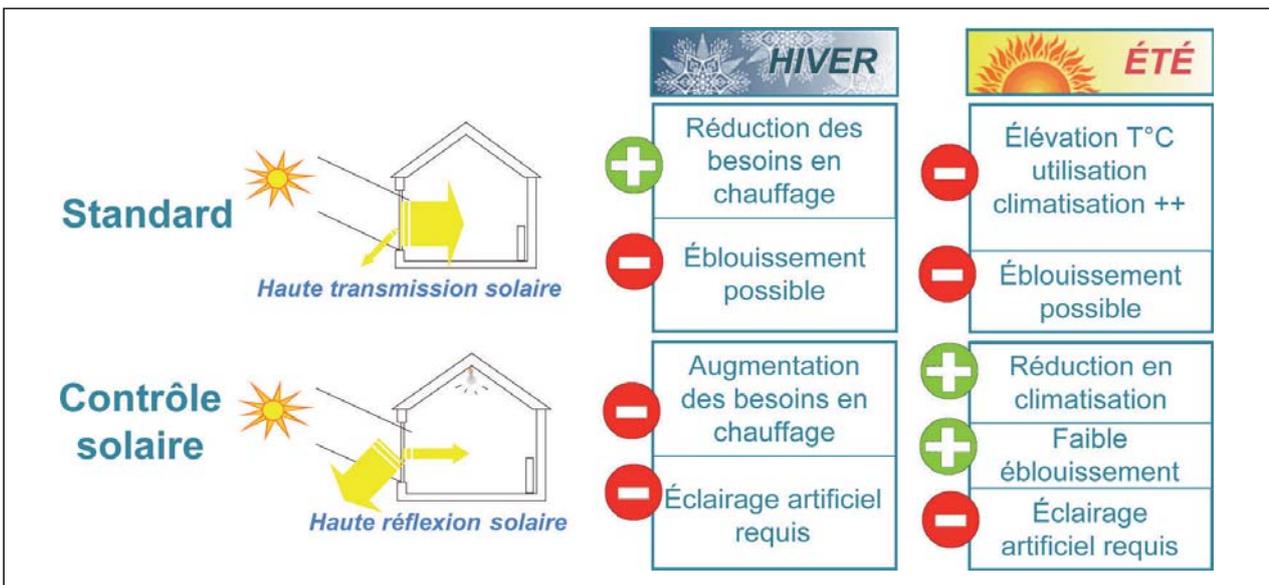


Figure 14

Synoptique des options de confort. Face à des besoins contradictoires en fonction de la saison, les solutions traditionnelles (choix entre vitrage standard ou contrôle solaire) trouvent leurs limites.

visible³ (Figure 12). Des couches réfléchissantes spécifiques de type métallique ou oxydo-métallique ont été conçues dans ce but. La Figure 13 montre les spectres de transmission de différents types de verres traités par dépôts de différentes couches minces : un premier type de couche mince coupe l'infrarouge lointain et laisse passer le visible et l'infrarouge solaire : c'est le verre « bas émissif » rencontré précédemment (paragraphe 3) ; un autre type de dépôt est destiné

à réfléchir l'ensemble de l'infrarouge proche et lointain tout en permettant la transmission des rayonnements du spectre visible : c'est le verre « contrôle solaire » (Figure 13).

5.2. L'électrochrome, un vitrage actif

La variation saisonnière, qui agit sur la définition des performances recherchées, rend la conception des vitrages difficile. Pour le résidentiel, par exemple, un contrôle solaire serait souhaitable en été pour éviter les apports en énergie thermique et éviter la climatisation ; en revanche un vitrage classique serait souhaitable en hiver pour bénéficier du chauffage par le rayonnement solaire (Figure 14).

3. Voir aussi l'ouvrage *La chimie et l'art, le génie au service de l'homme*. Chapitre de J.-C. Lehmann. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.



Figure 15

Effet du vitrage électrochrome.

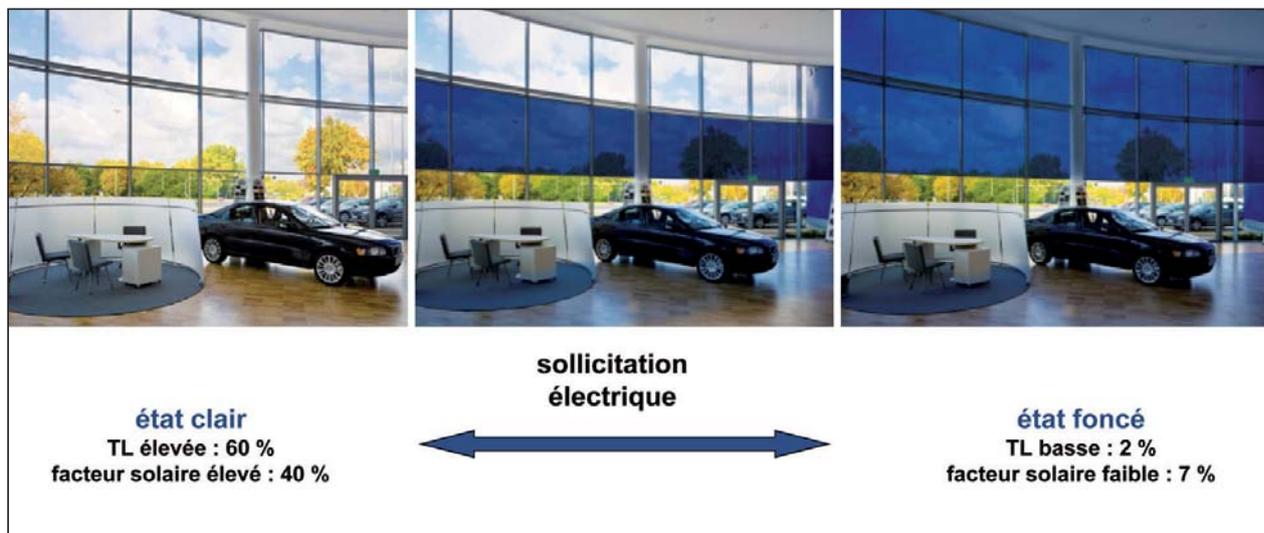


Figure 16

L'électrochrome pour optimiser confort visuel et thermique : une simple commande électrique fait passer le vitrage d'un état clair, avec une transmission lumineuse (TL) et un facteur solaire élevés, à un état foncé.

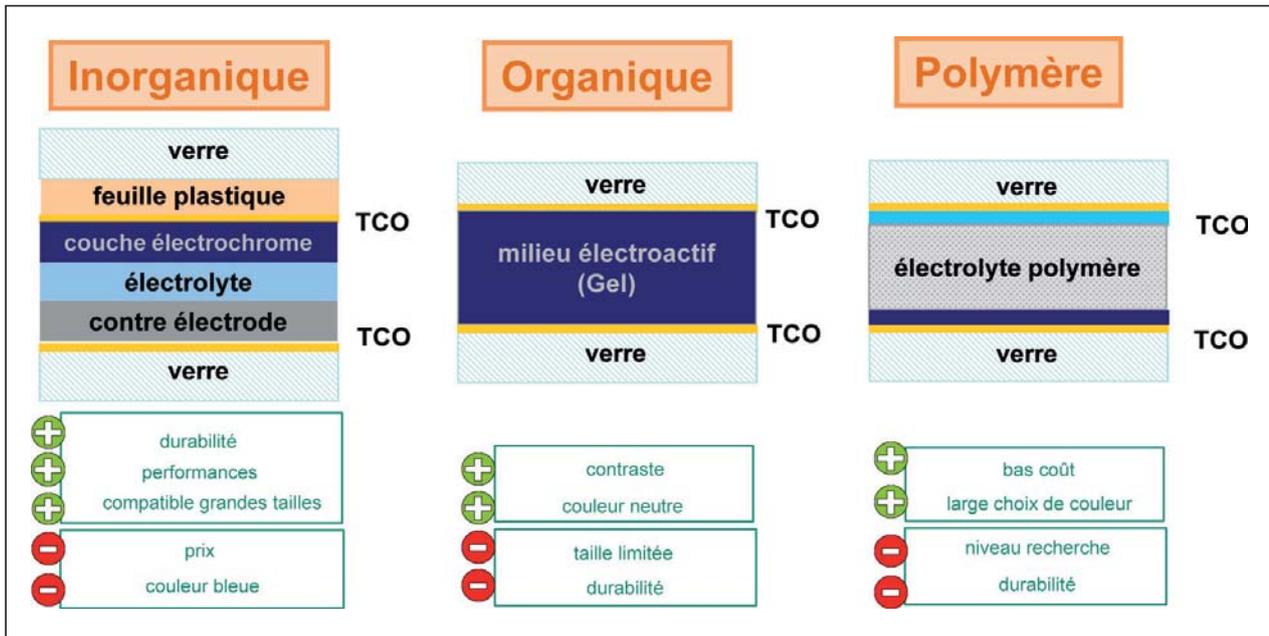
La conception d'un « vitrage actif », « intelligent », doit être développée pour contourner cette contradiction. Aujourd'hui, c'est le vitrage électrochrome qui présente les possibilités techniques les plus modernes dans ce contexte. Il s'agit d'un vitrage qui fonce sous l'effet d'une sollicitation électrique pouvant passer d'un état clair avec transmission lumineuse et facteur solaire élevés (toutes les radiations du soleil « passent ») à un état foncé, à transmission faible dans le visible et dans l'infrarouge. Il permet ainsi d'optimiser

confort thermique et confort visuel (**Figures 15 et 16**).

Différentes technologies permettent de réaliser des verres électrochromes (**Figure 17**) :

- la technologie « inorganique » met en œuvre le dépôt successif d'une série de couches minces ayant chacune un rôle spécifique : électrodes d'amenée de courant pour les TCO⁴, couches actives pour la couche électrochrome et pour la contre-électrode associée, électrolyte pour la conduction ionique. Ce système offre une

4. « Transparent conductive oxyde ».



bonne durabilité et des performances satisfaisantes ; il permet la réalisation de vitrages de grande taille adaptés au bâtiment, mais son prix est élevé du fait du coût élevé des machines de dépôt. Également, on ne peut éviter que les verres électrochromes présentent une coloration bleue – le retour d’expérience indique que les usagers s’y habituent avec une très grande facilité ;

– la technologie « organique » utilise un gel comme milieu électroactif, selon une technique déjà mûre, commercialisée par l’industrie automobile (rétroviseurs « électrochromes »). Les verres électrochromes organiques présentent un excellent contraste et leur couleur est ajustable par choix de la formulation de la couche. En revanche, la réalisation d’objets de grande taille par cette technique nécessiterait de maintenir le liquide entre de grandes surfaces ; par ailleurs, elle souffre des faibles performances de durabilité propres à la matière organique ;

– une troisième technologie utilisant des polymères est à l’étude. Très séduisante par la richesse structurale des polymères, elle offre potentiellement un foisonnement de propriétés possibles. Aujourd’hui elle ne constitue pas encore une solution concurrente des technologies inorganique ou organique.

Saint-Gobain a choisi de poursuivre la voie inorganique pour fonctionnaliser ses vitrages destinés aux bâtiments. La couche électrochrome est un oxyde de tungstène WO_3 dont la couleur varie en fonction de la quantité de cations dans la couche, de bleu foncé en excès de cations à bleu très clair en situation anionique. La tension électrique appliquée aux électrodes (les couches TCO) provoque la migration des cations à travers la couche électrolyte ; ils migrent de l’anode vers la cathode qui se modifie par oxydo-réduction et s’assombrit (*Figure 18*).

Le fonctionnement du système est basé sur l’existence

Figure 17

Comparaison des différentes technologies de verres : inorganiques, organiques et polymères.

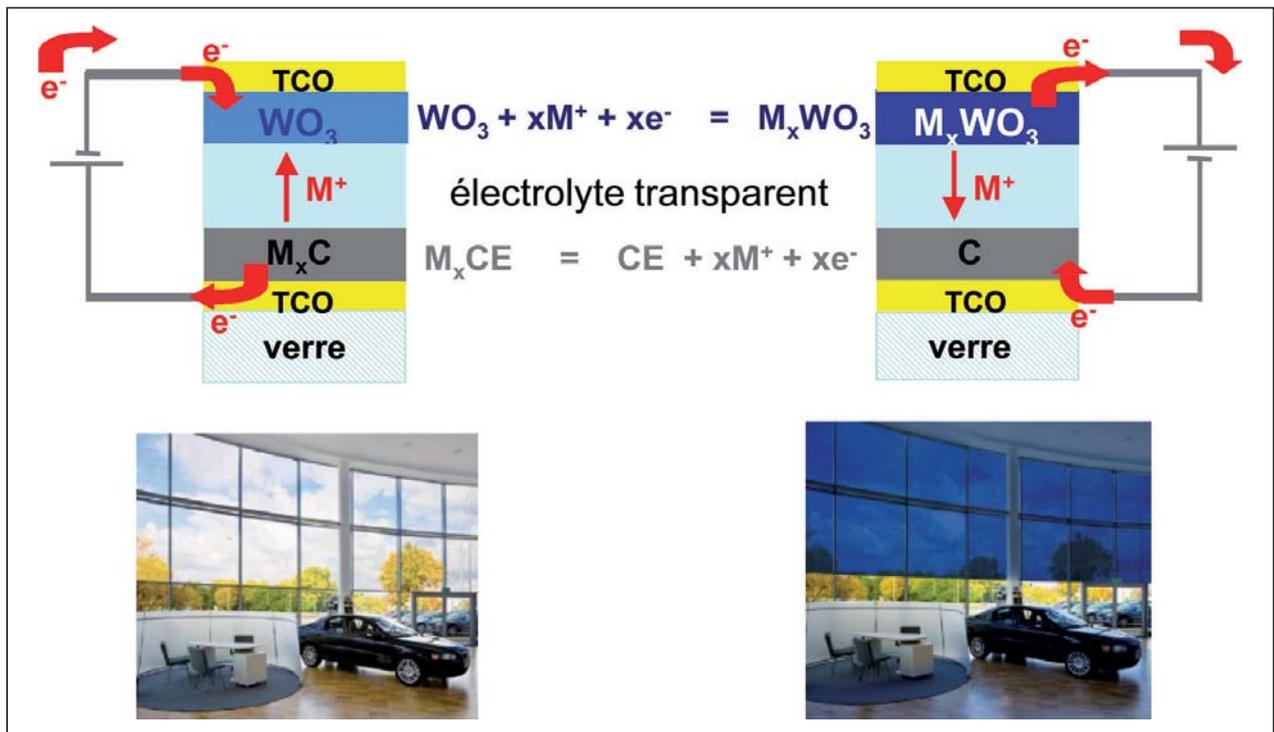


Figure 18

Schéma de fonctionnement d'un verre inorganique avec oxyde de tungstène. Lorsqu'on applique une tension électrique aux électrodes, les cations migrent à travers la couche électrolyte, de l'anode vers la cathode, laquelle qui se modifie par une réaction de réduction et s'assombrit.

d'un « effet mémoire » : quand on débranche la source, on conserve la couleur atteinte. Il n'y a aucune consommation électrique pour conserver la couleur ou la transparence, mais uniquement pour modifier le réglage. Un verre électrochrome à l'état transparent a quasiment les mêmes propriétés que le vitrage de contrôle solaire présenté plus haut ; cependant, il permet une souplesse dans le réglage du facteur solaire par passage du vitrage dans son état coloré, où la transmission lumineuse et le facteur solaire diminuent conjointement.

L'utilisation de verres électrochromes permet de contrôler les échanges énergétiques globaux d'un bâtiment, incluant ensemble aspect thermique et aspect lumière (éclairage) ; il optimise ainsi le confort de l'utilisateur. Un exemple : en cas d'éblouissement par une luminosité excessive, la solution classique est de fermer les stores,

mais ceci peut entraîner une surconsommation d'énergie d'éclairage, les stores fermés dans la journée obligeant le recours à la lumière artificielle ; l'utilisation d'un verre électrochrome permet un ajustement beaucoup plus fin.

Il est instructif de comparer la consommation d'énergie d'un bâtiment dans les deux situations suivantes : soit utilisation d'un double vitrage de type contrôle solaire (approximativement équivalent à un électrochrome à l'état clair), soit utilisation d'un électrochrome commandé selon une stratégie destinée à minimiser la consommation énergétique. Une simulation grossière fait ressortir l'avantage de l'électrochrome : il entraîne une consommation en chauffage un peu plus élevée en particulier au nord à cause de la diminution des apports du soleil, mais permet un gain important sur les postes « éclairage » et « climatisation ».

Pour évaluer ces gains énergétiques avec précision, il convient de faire une simulation soignée du bâtiment considéré, en prenant en compte sa localisation, sa configuration, ainsi que la stratégie de contrôle à adopter. Afin d'être les plus performants possibles, les électrochromes devront être ainsi être commandés par un « building management system » global. Par exemple,

il pourrait être nécessaire de contrebalancer une possible décision intempestive d'un utilisateur qui pourrait vouloir régler le contrôle en faveur du confort visuel, sans prendre en compte un éventuel effet négatif sur la consommation d'énergie. Confort de l'utilisateur, confort thermique, il faut adapter les stratégies de commande à la définition des objectifs du bâtiment.

L'avenir des vitrages convoque la chimie

La démarche technique raisonnée mise en œuvre par la profession du bâtiment pour concilier la qualité de la vie dans les bâtiments et la sobriété énergétique a déjà largement fait ses preuves, mais de belles perspectives de progrès se présentent encore.

Le classique « volet », que le talent des architectes permettait d'intégrer harmonieusement aux bâtiments, a fait place aux vitrages passifs traités par des couches appropriées capables de laisser passer l'ensoleillement tout en présentant d'excellentes performances d'isolation thermique et en permettant une gestion fine de la transmission du rayonnement solaire en fonction des besoins.

L'utilisation de vitrages électrochromes, technologie qui est proche de la maturité, va permettre des gains d'énergie et une gestion de l'éblouissement tout en conservant la transparence du vitrage. D'autres solutions techniques de modification des vitrages sont à l'étude et n'ont pas été présentées ici. En particulier, de nouvelles méthodes font appel au mélange de solutions organiques et inorganiques, mettant au premier plan l'importance de la chimie pour obtenir les nouvelles fonctionnalités des futurs vitrages intelligents, vitrages du futur.

Crédits photographiques

Fig. 15 et 16 : Saint-Gobain.