

# CHIMIE ET HABITAT, LES VITRAGES PLATS

Éric Bausson

## Partie des programmes de physique-chimie associées

- ▶ Programme de physique-chimie de la classe de seconde générale et technologique – partie « Constitution et transformations de la matière »
- ▶ Programme de physique-chimie de la classe de première et de terminale STI2D – partie « Matière et matériaux »
- ▶ Programme de physique-chimie de première STD2A – partie « Connaître et transformer les matériaux »
- ▶ Programme de la spécialité physique-chimie de première générale – partie « constitution et transformations de la matière » et partie « mouvement et interactions »

**Mots-clés :** verre, silice, fondants, oxydoréduction, recyclage

## INTRODUCTION

Le vitrage occupe aujourd'hui une place essentielle dans l'architecture moderne, à la croisée des enjeux énergétiques, esthétiques et environnementaux. Bien plus qu'un simple matériau transparent, le verre résulte d'un savoir-faire ancien dont les premières traces remontent à l'Antiquité. Pline l'Ancien, dans son *Histoire naturelle* (Livre XXXVI), décrit déjà la fabrication du verre, évoquant le rôle fondamental de la silice et des fondants comme le natron (carbonate hydraté naturel de sodium, de formule  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ).

Il rapporte également l'existence de vitrages rudimentaires utilisés dans certaines villas romaines, signe que l'Humanité avait compris très tôt l'intérêt de contrôler l'apport lumineux tout en assurant une protection contre les intempéries.

Depuis ces premiers usages, la production du verre a connu un essor considérable. Aujourd'hui, l'industrie verrière mondiale dépasse 130 millions de tonnes par an, dont une part significative est dédiée aux vitrages pour le bâtiment. En Europe, la très grande majorité des fenêtres installées sont constituées de double vitrage, et les triples vitrages progressent rapidement dans les régions froides. Le secteur du bâtiment représente environ 45 % de l'usage du verre plat, notamment grâce à l'essor des façades vitrées et aux exigences croissantes d'efficacité énergétique (facteurs solaires, isolations thermique et acoustique).

L'évolution technologique amorcée au  $xx^e$  siècle par le procédé « float », traitements de surface, vitrages à faible émissivité<sup>1</sup>, a profondément transformé le rôle du verre dans la construction. Il n'est plus seulement une ouverture vers l'extérieur ; il devient un matériau fonctionnel, capable de filtrer le rayonnement solaire, d'améliorer l'isolation thermique, de produire de l'électricité ou même de varier sa transparence selon les besoins.

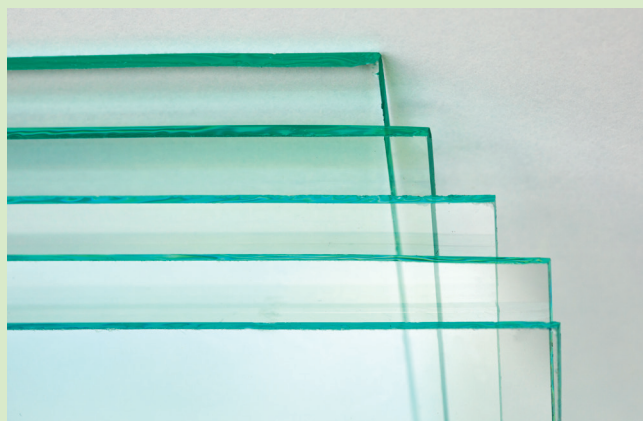


Figure 1. La fabrication du verre plat permet d'obtenir des verres d'épaisseur et de surface différentes.

## COMMENT FABRIQUE-T-ON DU VERRE PLAT ?

Chaque année, l'industrie du verre transforme plus de 150 millions de tonnes de sable (Fig. 2) en produits essentiels : fenêtres, miroirs ou fibres optiques. Le verre, matériau fondamental, naît d'une recette perfectionnée depuis des millénaires. Son ingrédient principal est le sable de quartz très pur (plus de 99 %), extrait de carrières comme ci-contre, représentant 70 à 75 % du mélange.



Figure 2. Carrière de sable blanc à ciel ouvert.

Il est formé en faisant réagir à haute température (environ 1 600 °C) au moins trois composants distincts parmi lesquels :

- ▶ de la silice  $\text{SiO}_2$  apportée par du sable ;
- ▶ du carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ;
- ▶ du carbonate de calcium (ou calcaire)  $\text{CaCO}_3$ .

Le calcin (verre plat recyclé) peut être ajouté avec les matières premières. Cet ajout permet de réduire la consommation de matières premières et jusqu'à 30 % d'énergie.

Le carbonate de sodium, dénommé fondant, abaisse la température de fusion du verre car la silice seule fond à 1 750 °C. Le carbonate de calcium apporte une protection chimique pour le verre formé, en le protégeant en particulier des effets de l'eau sur la surface du verre où les liaisons entre silicium et oxygène qui forment le squelette du verre, seraient progressivement rompues.

Ces matières sont stockées dans de grands silos puis pesées automatiquement avec une grande précision avant d'être mélangées pour former une poudre parfaitement homogène. C'est aussi à ce stade qu'on peut ajouter des oxydes métalliques pour colorer le verre (cobalt, chrome, etc.).

Voici quelques couleurs obtenues suivant l'ion d'un élément de transition présent dans le verre :

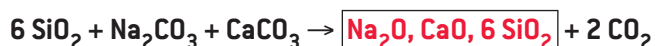
ion	$\text{Cr}^{3+}$	$\text{Cr}^{6+}$	$\text{Mn}^{3+}$	$\text{Fe}^{2+}$	$\text{Fe}^{3+}$	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$
couleur du verre	Vert	Jaune	Pourpre	Vert-bleu	Jaune	Bleu	Brun	Bleu

1. En termes simples, l'émissivité est la capacité d'un matériau à émettre de l'énergie sous forme de rayonnement thermique. Un vitrage à faible émissivité a pour propriété de filtrer certaines longueurs d'onde du rayonnement solaire, en particulier les rayons infrarouges responsables de l'élévation de la température intérieure d'un bâtiment, tout en laissant passer la lumière visible pour que la luminosité intérieure soit optimale.

Le mélange passe à l'état liquide dans le four pendant 24 à 50 heures, le temps d'éliminer bulles et impuretés et d'obtenir un verre liquide et homogène.

On forme alors un verre composé de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ). La décomposition des carbonates s'accompagne d'un dégagement de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ .

Voici l'équation chimique modélisant tout ceci :



On obtient un solide non cristallin, c'est-à-dire qu'il présente une structure partiellement désordonnée à l'échelle atomique.

Pour le verre plat, on utilise le procédé « float » pour obtenir un verre flotté. Le verre fondu est versé sur un bain d'étain liquide dans une atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation de l'étain. Le verre liquide étant moins dense que l'étain liquide, il flotte et s'étale en un ruban aux surfaces parfaitement parallèles, sans polissage nécessaire (Fig. 3). L'épaisseur finale, allant de moins d'un millimètre à plus de deux centimètres, est réglée par la vitesse d'extraction du ruban. Plus cette vitesse est importante, plus le verre plat est fin.



Figure 3. Ruban de verre flotté à l'usine de Chanteraine,  
© Photo Jean-Paul Bonal / DR / Archives de Saint-Gobain.

Après la mise en forme, le verre est encore fragile à cause des tensions internes car ses différentes parties refroidissent à des vitesses différentes. Par exemple, la couche externe peut refroidir plus rapidement et se contracter, tandis que la couche interne reste plus chaude et se dilate. Ce décalage crée des tensions dans les couches externes plus froides et une compression dans les couches internes plus chaudes lors de la solidification du verre. Pour réduire cela, le verre passe donc dans un long four de recuisson où il est réchauffé puis refroidi lentement pour éliminer ces tensions et obtenir solidité et stabilité. Ensuite viennent la découpe, souvent guidée par laser, le polissage éventuel et un contrôle qualité minutieux utilisant caméras et lasers. Les pièces défectueuses sont renvoyées en recyclage (calcin) et repartent dans le four initial. Entre le four où a lieu la fusion des matières premières avec le calcin et la zone de découpe, une usine fait près de cinq cents mètres de long !

Certains produits reçoivent des traitements supplémentaires : la trempe (qui multiplie la résistance par cinq) pour les parois de douche par exemple ou l'application de couches métalliques pour miroirs et verres solaires. Les vitrages d'épaisseurs diverses et de surfaces différentes sont stockés avant expédition.

### Zoom sur le calcin

Nous avons l'habitude de placer nos bouteilles en verre usagées et autres contenants creux en verre dans les conteneurs verts dédiés. Pour l'obtention du calcin, qui remplace les matières premières dans le four, il faut qu'il ait la même composition chimique que les futurs vitrages. Pour cette raison, le calcin suit une chaîne de recyclage très rigoureuse :

- ▶ lors de la déconstruction, seuls les vieux vitrages sont récupérés et cassés ;
- ▶ ils sont amenés dans une usine qui trie et broie ces anciens vitrages.

Il faut absolument éviter toute pollution du calcin avec des traces de métaux ou d'autres matériaux car cela pourrait rendre le nouveau verre produit inutilisable. Donc, ce n'est pas chose aisée de recycler du verre plat !



Figure 4. Le calcin, © Saint-Gobain.

## COMMENT LIMITER LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN BÂTIMENT VITRÉ EN ÉTÉ ET/OU EN HIVER ?

Pour limiter la consommation d'énergie et favoriser le bien-être de ses occupants, les vitrages des immeubles doivent laisser passer la lumière visible quels que soient la saison et le reste du rayonnement solaire (infrarouge et ultraviolet) en hiver mais l'absorber et/ou le réfléchir en été.

Pour absorber les ultraviolets, on teinte dans la masse un verre en jaune clair – orangé, en utilisant du dioxyde de titane  $\text{TiO}_2$  associé aux ions  $\text{Ce}^{3+}$  et/ou  $\text{Ce}^{4+}$  de l'élément cérium, membre de la famille des lanthanides qui, avec le scandium et l'yttrium, sont dénommés « terres rares » (ces éléments sont présents partout sur Terre mais sont disséminés en très faible quantité).

Pour la réflexion des infrarouges, responsables de la chaleur des bâtiments lorsque le rayonnement solaire est important, le verre électrochrome est capable d'être teinté à la demande en appliquant une tension électrique consommant peu d'énergie. Cela permet de réfléchir les infrarouges en saison chaude pour limiter ainsi la consommation d'énergie due aux climatiseurs. Pour obtenir ce verre électrochrome, il faut appliquer, sur un verre plat à l'extérieur du vitrage, différentes couches sur une épaisseur totale d'un micron ( $1 \times 10^{-6}$  m) comme l'indique la figure 5 :

- ▶ deux conducteurs transparents de part et d'autre qui doivent être capables de transporter le courant mais aussi de laisser passer la lumière ;
- ▶ une électrode de travail qui se teinte en bleu lors de la réduction d'oxydes de tungstène  $\text{WO}_3$  et de molybdène  $\text{MoO}_3$  ou en brun pour les oxydes de fer ( $\text{FeO}$ ) et de bismuth ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) ;
- ▶ un conducteur ionique (électrolyte) qui ne laisse passer que les ions  $\text{Li}^+$  en bloquant le passage des électrons. Les ions  $\text{Li}^+$  se déplacent de la contre-électrode vers l'électrode de travail ;
- ▶ une contre-électrode où a lieu une oxydation permettant d'amplifier le changement de teinte de l'électrode de travail.

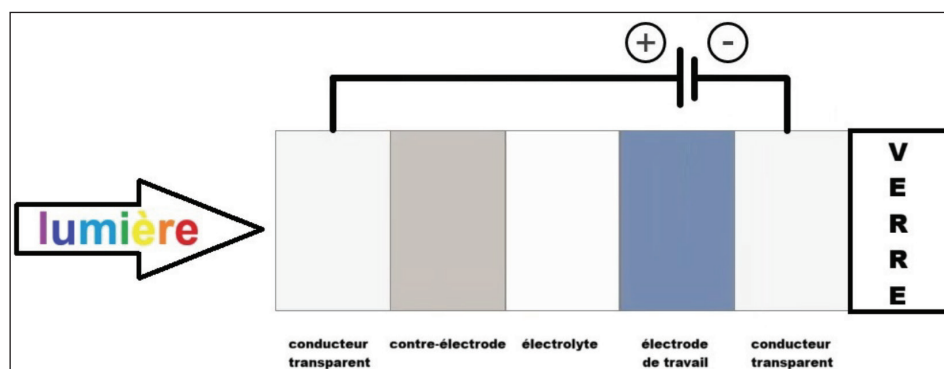


Figure 5. Schéma de principe lors de la teinte d'un vitrage.



Ainsi, les infrarouges traversent peu le vitrage en saison chaude lorsque le vitrage est teinté alors qu'ils le font en saison froide si le vitrage est incolore.

Il est ainsi possible de modifier la teinte du vitrage comme le montre la **figure 6**.

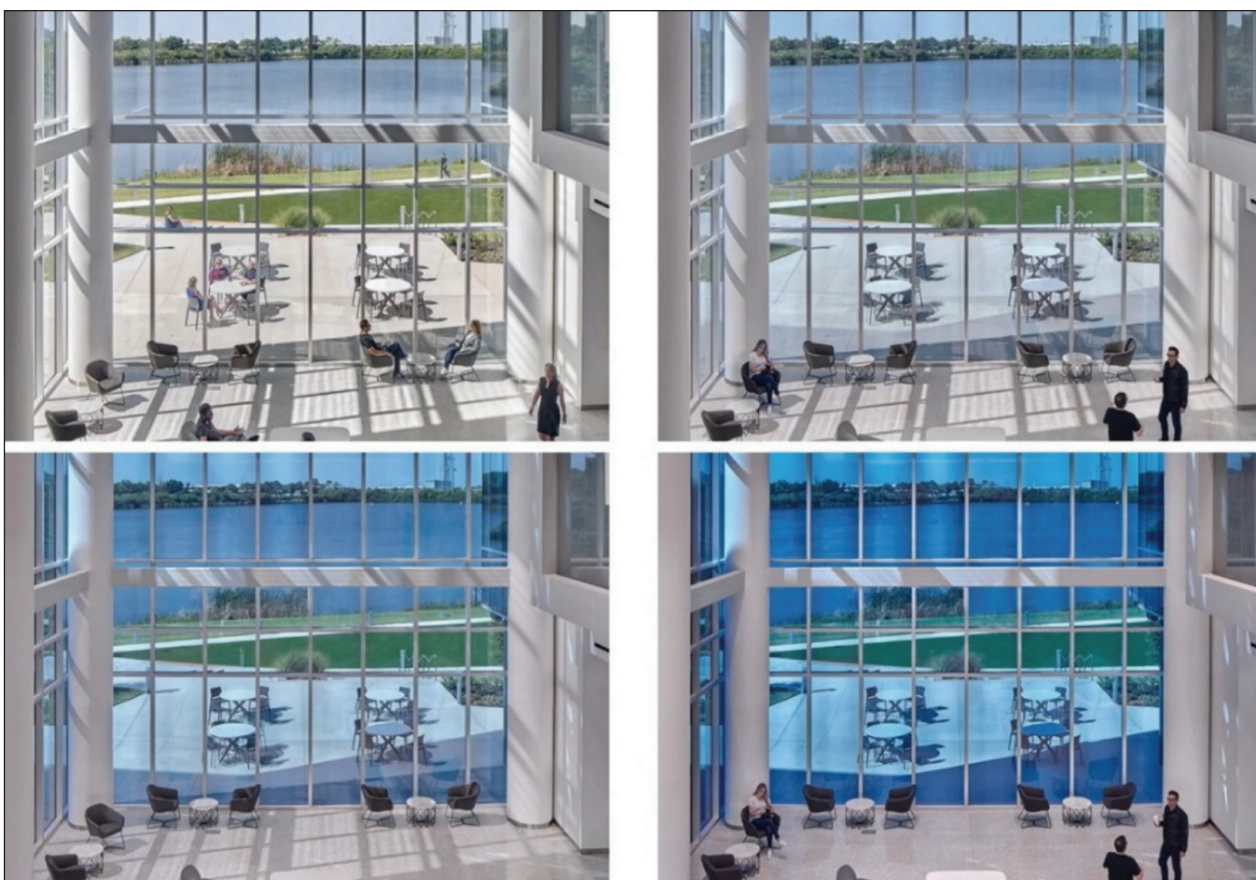


Figure 6. Modification de la teinte d'un vitrage, © Saint-Gobain.

### QUELS SONT LES AUTRES PROCÉDÉS UTILISÉS POUR RENDRE OPAQUE OU TRANSLUCIDES UNE SURFACE VITRÉE ?

Prenons l'exemple de parois vitrées intérieures pouvant être opaques ou translucides suivant le cas [Fig. 7].



Figure 7. Parois de douche avec des cristaux liquides encapsulés, © Saint-Gobain.

Le champ électrique n'agit pas en colorant le verre, mais en modifiant l'organisation microscopique de la matière encapsulée dans le vitrage, ce qui change la façon dont la lumière est transmise, diffusée ou absorbée.

Pour les verres à cristaux liquides encapsulés, en l'absence de champ électrique, les cristaux liquides sont orientés de manière aléatoire, donc le verre apparaît opaque ou a un aspect dépoli.

Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les cristaux liquides possédant un moment dipolaire (les barycentres des charges partielles positives et négatives ne sont pas confondus), s'orientent tous dans la direction du champ électrique. La lumière traverse le matériau, donc le verre devient totalement transparent.

Il existe aussi des vitrages où des colorants sont encapsulés et sous l'action d'un champ électrique, on peut rendre quasi opaque ou transparente la surface vitrée (Fig. 8).

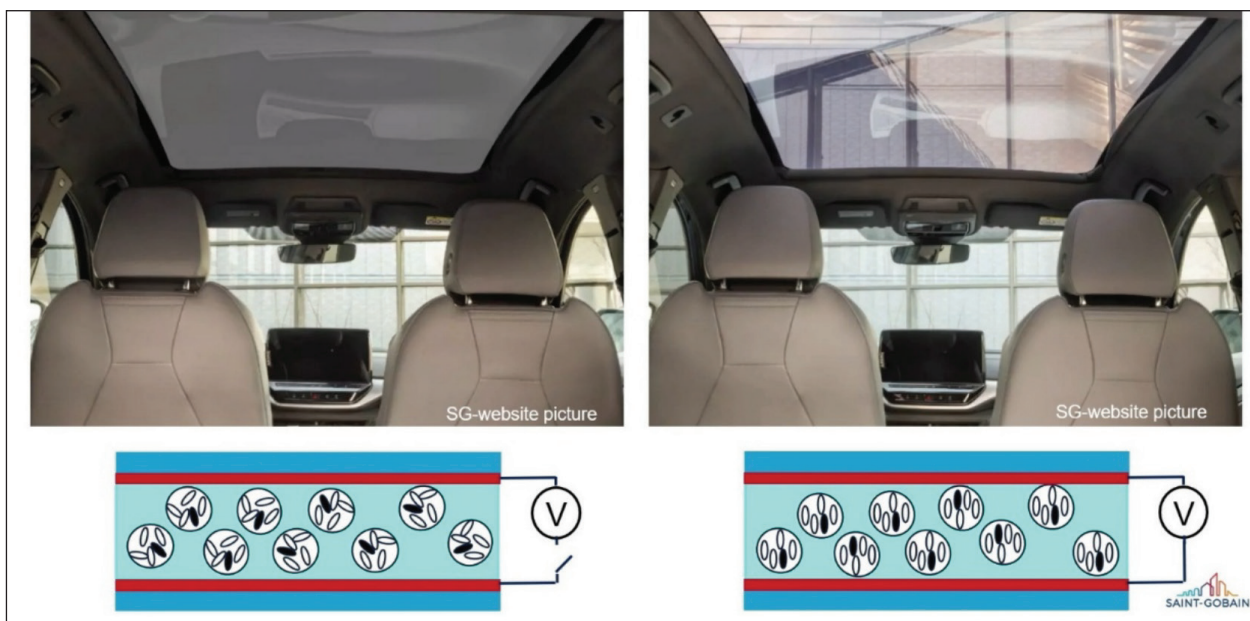


Figure 8. Toits de voiture avec des colorants (en noir) encapsulés, © Saint-Gobain.

Les scientifiques cherchent actuellement à développer de nouveaux vitrages extérieurs capables de réfléchir sélectivement une partie du rayonnement non plus vers le sol mais vers le ciel. Cela permettrait de limiter l'augmentation de la température de l'air extérieur.

## CONCLUSION

Les vitrages plats représentent aujourd'hui bien plus que de simples surfaces transparentes car ils sont le fruit d'un processus de fabrication sophistiqué alliant précision industrielle et exigences de performance. Depuis la fusion de la silice jusqu'au refroidissement contrôlé, chaque étape garantit des propriétés mécaniques, thermiques et optiques optimales. Les innovations récentes, telles que les verres à faible émissivité ou encore les vitrages actifs intégrant des films électrochromes, permettent de répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels. À l'avenir, les développements en matière de verre photovoltaïque, de vitrages intelligents capables d'adapter automatiquement leur transparence ouvrent de nouvelles perspectives pour les bâtiments, les transports et les applications industrielles. Ces avancées promettent non seulement des gains d'efficacité énergétique, mais aussi une meilleure intégration des vitrages dans des architectures plus durables. Le vitrage plat ne cesse d'évoluer, conjuguant esthétique, performance et innovation pour répondre aux enjeux du XXI<sup>e</sup> siècle.

## SOURCES PRINCIPALES

La seconde partie de ce dossier s'appuie sur le colloque « Chimie et habitat » du 5 novembre 2025, plus précisément sur les conférences de M. Michele Schiavoni sur les vitrages intelligents et de M. François Guillemot sur le recyclage du verre.

## POUR EN SAVOIR PLUS

Voici quelques liens vous permettant d'élargir vos connaissances sur le verre, l'habitat et la lumière :

- ▶ les vidéos des conférences du colloque « Chimie et habitat » du 5 novembre 2025 ;
- ▶ les vidéos des Conférences du colloque « Chimie et Lumière » du 26 février 2020 ;
- ▶ des ressources du site Mediachimie sur le thème du verre (il y en a plus de 350 !) ;
- ▶ dossier de grand oral « Comment la chimie innove-t-elle sans cesse dans l'industrie du verre ? » – Éric Bausson.

Éric Bausson est professeur de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen