

LES VERRES INTELLIGENTS

Eric Bausson

Ce dossier s'appuie sur le colloque « Chimie et habitat » du 05 novembre 2025, plus précisément sur les conférences de M. Schiavoni Michele sur les vitrages intelligents et de M. Guillemot François sur le recyclage du verre.

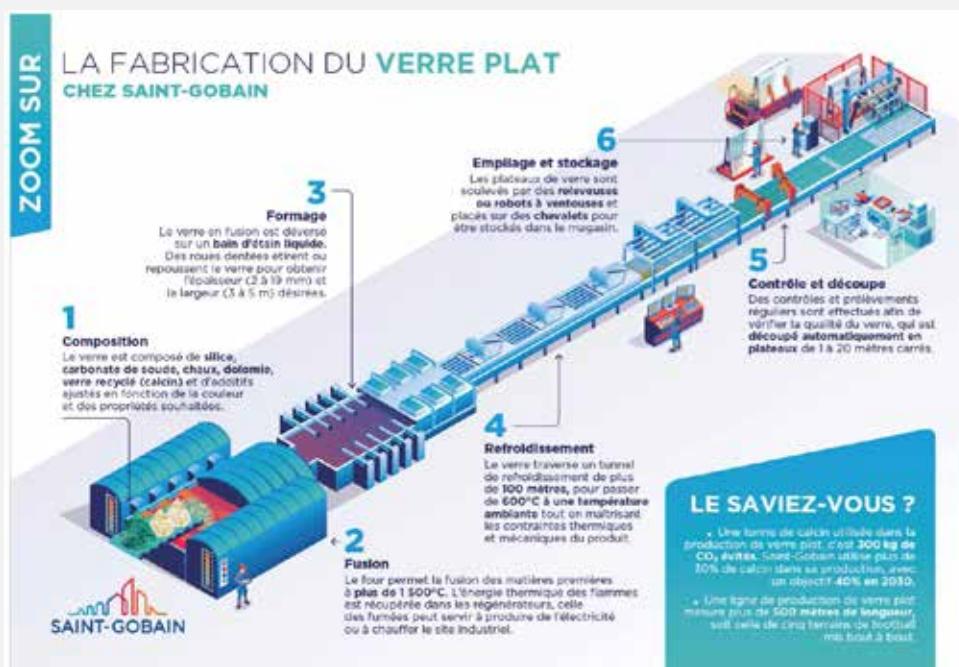
Parties des programmes de physique-chimie :

Programmes de physique-chimie de	Parties
Secondes générale et technologique	Constitution et transformations de la matière
Secondes générale et technologique	Modélisation des transformations de la matière et transfert d'énergie
Première et terminale STI2D	Matière et matériaux

MOTS-CLÉS : verre, silice, fondants, oxydoréduction, recyclage, décarbonation

ANGLE CHOISI : Comment fabrique-t-on du verre et quelles sont les avancées récentes dans le vitrage ?

La fabrication du verre plat est un processus complexe se déroulant en six étapes. Nous allons aborder certaines de ces étapes dans ce dossier et ensuite étudier quelques avancées technologiques.



La fabrication du verre plat – Conférence de M. Guillemot sur le recyclage du verre – Saint-Gobain©

A. Introduction

Le verre est un matériau dont l'histoire se confond avec celle des civilisations humaines. Ses premières traces d'utilisation, retrouvées au Proche-Orient il y a plus de 3000 ans, montrent que les artisans maîtrisaient déjà l'art de la fusion du verre pour produire des objets décoratifs ou utilitaires. Progressivement, les techniques se sont affinées : les Égyptiens puis les Romains ont perfectionné les procédés de coloration et de soufflage, technique utilisée en raison de la capacité du verre à passer de l'état solide à l'état liquide par un état intermédiaire pâteux.

Le verre est un matériau de plus en plus présent dans la vie quotidienne, notamment pour la fabrication de récipients, contenants et de vitrages.

Sur le plan chimique, le verre traditionnel est constitué de silice (SiO_2), entrant dans la composition de nombreux minéraux (sable, grès, etc.) à hauteur de 27 % de la croûte terrestre, à laquelle sont ajoutés divers fondants comme les carbonates de sodium et de calcium et d'autres composés suivant les propriétés recherchées (transparence, rigidité, inertie chimique et facilité de mise en forme, etc.).



Amphore en verre – Musée des Antiquités nationales -Saint-Germain-en-Laye

L'évolution du verre s'est poursuivie avec l'ère industrielle, marquée par l'invention du procédé « float » au XX^e siècle, permettant la production de grandes surfaces de verre parfaitement planes grâce au verre fondu placé sur une surface plane d'étain liquide.

Plus récemment, les enjeux énergétiques ont conduit à de nouvelles innovations. Les verres à faible émissivité (verres « low-e »), obtenus par dépôt de couches minces d'oxydes métalliques, réduisent considérablement les déperditions de chaleur tout en laissant passer la lumière.

Les doubles et triples vitrages, séparés par des lames de gaz isolants comme l'argon ou le krypton, améliorent encore l'efficacité thermique. Enfin, les technologies les plus récentes explorent des solutions intelligentes, comme les vitrages électrochromes dont la transparence varie selon la luminosité, ou les vitrages photovoltaïques capables de produire de l'énergie.

Ainsi, le verre, matériau millénaire, continue et continuera d'évoluer grâce aux avancées scientifiques et technologiques, s'imposant aujourd'hui comme un élément clé de la transition énergétique et du confort thermique des bâtiments modernes, sans oublier le bien-être qu'il peut procurer à ses occupants !

B. Rôle des fondants dans la fusion du verre

Le verre est principalement composé de silice (SiO_2), un minéral très abondant dans la nature. Cependant, la silice pure possède une température de fusion très élevée, autour de 1720 °C, ce qui rend sa mise en forme difficile et coûteuse.

Pour faciliter la fabrication du verre, les verriers ajoutent des substances appelées « fondants », comme le carbonate de sodium (Na_2CO_3) ou le carbonate de calcium (CaCO_3). Un mélange $\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ fond autour de 1100 °C, tandis qu'un mélange $\text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3$ ne fond que vers 1400 °C. En combinant plusieurs fondants, on peut obtenir un verre dont la fusion commence dès 950 °C. Les propriétés mécaniques, optiques et chimiques du verre dépendent étroitement de la nature et de la proportion des fondants utilisés.

1 Pourquoi la fabrication du verre à partir de silice pure serait-elle trop coûteuse industriellement ?

.....
.....
.....

2 Quel est le rôle principal d'un fondant dans la fabrication du verre ?

.....
.....
.....

3 Donner la composition atomique des carbonates de sodium et de calcium.

.....
.....
.....

4 Citer un exemple d'objet du quotidien fabriqué grâce au verre obtenu par ajout de fondants.

.....
.....
.....



Processus de fusion du verre

C. Protocole de fabrication d'un verre

Depuis quelques siècles, la fabrication du verre suit, à peu près, toujours le même protocole.

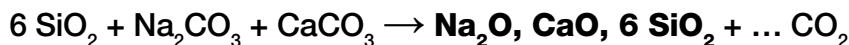
Voici résumée ci-dessous la formation du verre classique dénommé « verre sodo-calcaire ».

Il est formé en faisant réagir à haute température au moins trois composants distincts parmi lesquels :

- de la silice SiO_2 apportée par du sable;
- du carbonate de sodium Na_2CO_3 ;
- du carbonate de calcium (ou calcaire) CaCO_3 .

On forme alors un verre à l'état liquide composé de silice (SiO_2), d'oxyde de sodium (Na_2O) et d'oxyde de calcium (CaO).

Voici l'équation chimique, pas totalement ajustée, où figurent en gras les constituants du verre :



1 Que vaut le nombre stœchiométrique lié au dioxyde de carbone CO_2 ?

2 Si nous respectons les proportions stœchiométriques, quelle quantité de matière faut-il en carbonates Na_2CO_3 et CaCO_3 pour la transformation de 18 mol de silice SiO_2 ?

3 Dans ce cas de figure, quelle quantité de matière en dioxyde de carbone CO_2 est libérée ?

4 En déduire un des inconvénients de la fabrication du verre.

5 Lors de ce processus de fabrication du verre, quelle est l'autre source de dioxyde de carbone ?

D. Recyclage du verre

Et si une des réponses au dégagement important du dioxyde de carbone CO₂ était le recyclage du verre ?

En utilisant du calcin (vitrage recyclé), voici les matières premières engagées dans la production du verre :



1 Pour quelle raison l'utilisation du calcin réduit l'émission de dioxyde de carbone lors de la production de verre ?

2 Que faudrait-il aussi modifier pour diminuer encore plus la production de dioxyde de carbone dans ce processus ?

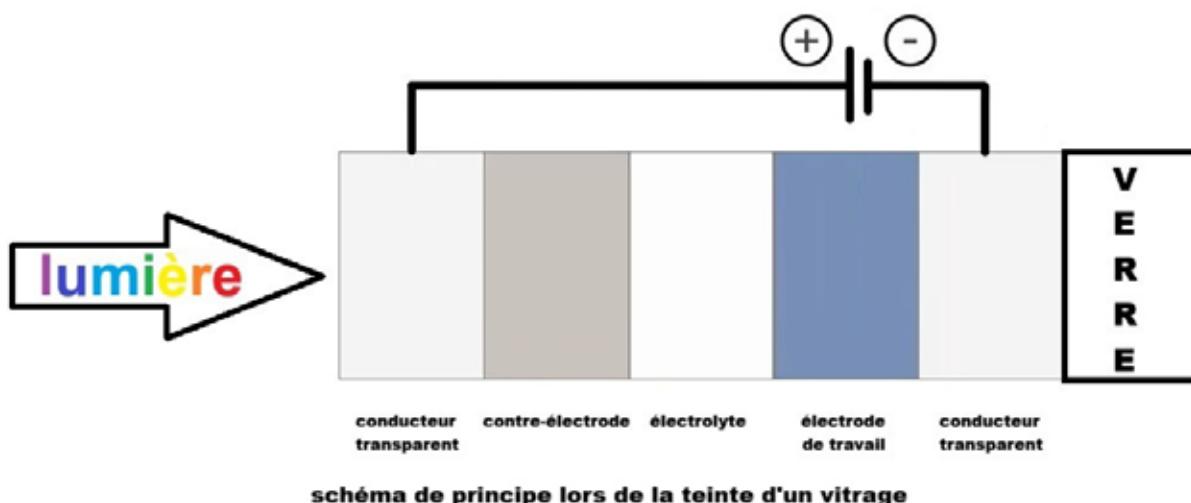
Le recyclage du verre n'est pas chose aisée, car parmi tous les types de verre (bouteilles, vitrages, verres à boire, laine de verre, etc.), seuls les anciens vitrages peuvent être recyclés pour en produire de nouveaux. En effet, une seule canette en aluminium dans un four peut insérer quelques éclats d'aluminium fragilisant le verre. La collecte et le tri sélectif doivent donc être très rigoureux.

E. Quelles sont les avancées technologiques récentes dans l'industrie du verre ?

- **Comment limiter la consommation d'énergie d'un bâtiment vitré en été et/ou en hiver ?**

Il faut agir dès la conception du vitrage sur ses propriétés physiques liées à l'absorption, la transmission ou la réflexion du rayonnement solaire. Pour les infrarouges, responsables de la chaleur des bâtiments vitrés, les chimistes et physiciens se sont donc penchés sur cette question pour chercher un matériau innovant, un verre électrochrome capable d'être teinté à la demande en appliquant une faible tension électrique (2,5 V) et consommant peu d'énergie car l'intensité du courant électrique est de l'ordre de quelques milliampères. Ainsi, les infrarouges traversent peu le vitrage en saison chaude lorsque le vitrage est teinté et le font plus intensément en saison froide si le vitrage est incolore.

À l'extérieur du vitrage, sur une épaisseur d'un micron (1.10^{-6} m), il faut appliquer différentes couches comme l'indique le schéma suivant :



- 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 lors d'une réaction d'oxydoréduction d'oxydes de tungstène ou d'autres;
 - un conducteur ionique (électrolyte) qui ne laisse passer que les ions Li^+ en bloquant le passage des électrons;
 - une contre-electrode où a lieu une autre réaction d'oxydoréduction permettant d'amplifier le changement de teinte de l'électrode de travail;
- Il est ainsi possible de modifier la teinte du vitrage comme le montre l'illustration ci-dessous.



1 Lors de la teinte du vitrage, comment se déplacent les ions Li^+ ?

2 Est-ce une réduction ou une oxydation qui a lieu au niveau de l'électrode de travail qui se teinte ?

3 En déduire la nature de l'autre réaction d'oxydoréduction se produisant à la contre-electrode.

- Quels sont les autres procédés utilisés pour rendre opaque ou transparente une surface vitrée ?

Voici deux exemples :



Toit de voiture avec des colorants (en noir)
encapsulés



10



Paroi de douche avec des cristaux liquides encapsulés

4

Décrire le principe de fonctionnement de ces deux techniques.

F. Conclusion

Même si le verre est un matériau créé et utilisé depuis très longtemps, la recherche demeure très active pour améliorer ses performances. On est capable d'adapter leur transparence, leur capacité d'isolation ou leur transmission lumineuse. Cela a pour effet d'apporter des solutions concrètes aux enjeux de confort thermique, de réduction de la consommation énergétique des bâtiments et de protection contre l'éblouissement ou la surchauffe.

L'association entre recyclage performant et innovations dans le domaine des vitrages ouvre des perspectives particulièrement prometteuses pour l'architecture et l'urbanisme de demain.

Une nouvelle piste intéressante consiste à envisager des vitrages capables de réfléchir sélectivement une partie du rayonnement non plus vers le sol, ce qui peut contribuer aux îlots de chaleur urbains, mais vers le ciel. Une telle approche pourrait à terme participer à une meilleure régulation thermique des bâtiments tout en minimisant l'impact énergétique global. Ainsi, le verre, matériau millénaire, continue d'évoluer et de se réinventer au service d'un avenir plus durable.

La lecture des diverses vidéos des conférences du colloque « Chimie et habitat » du 05 novembre 2025 est une source d'information très importante sur différents aspects de notre habitat.

Sur le thème du verre, voici d'autres sources d'information :

1. Conférences du colloque [Chimie et Lumière](#) qui a eu lieu le 26/02/20 :

- [Comment jouer avec le feu et la lumière pour colorer le verre ?](#) – Jacques Livage
- [Vers des vitrages intelligents et connectés pour des bâtiments durables et confortables](#) – Stéphane Auvray
- [Laisser entrer la lumière](#) – Juliette Ruchmann

2. Quelques ressources du site Mediachimie sur le thème du verre (il y en a plus de 350!) :

- [Réaction en un clin d'œil : faire des vitrages avec du sable](#)
- De la Manufacture royale des glaces et miroirs, créée en 1665, par Colbert ministre de Louis XIV à la société actuelle connue sous le nom de Saint Gobain : [SAINT GOBAIN historique](#)
- Dossier de grand oral « [Comment la chimie innove-t-elle sans cesse dans l'industrie du verre ?](#) » - Eric Bausson

B. Rôle des fondants dans la fusion du verre

- 1.** Parce qu'elle nécessiterait de chauffer à une température très élevée (1 720 °C), ce qui demande beaucoup d'énergie et donc un coût très important.
- 2.** Un fondant sert à abaisser la température de fusion de la silice.
- 3.** Carbonate de sodium (Na_2CO_3) : 2 atomes de sodium, un atome de carbone et trois atomes d'oxygène
Carbonate de calcium (CaCO_3) : 1 atome de calcium, un atome de carbone et trois atomes d'oxygène
- 4.** Exemples possibles : bouteille en verre, vitre, verre de table, lampe, bocal alimentaire...

C. Protocole de fabrication d'un verre

- 1.** Il vaut 2.
- 2.** D'après l'équation, pour la transformation de 18 mol de silice SiO_2 , il faut six fois moins en carbonates Na_2CO_3 et CaCO_3 donc trois moles de chaque.
- 3.** D'après l'équation ajustée $6 \text{ SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}, 6 \text{ SiO}_2 + 2 \text{ CO}_2$, il se forme trois fois moins de CO_2 que de SiO_2 consommé. Donc pour 18 mol de SiO_2 consommé, sont produits 6 mol de CO_2 .
- 4.** La fabrication du verre dégage donc du dioxyde de carbone, un des gaz responsables du réchauffement climatique.
- 5.** D'après l'illustration, une partie de l'énergie nécessaire est produite par combustion du gaz de ville libérant elle aussi du dioxyde de carbone, selon $\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 = 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

D. Recyclage du verre

- 1.** Le calcin réduit la consommation de nouvelles matières première (SiO_2 , Na_2CO_3 , CaCO_3 , etc.) engendrant moins de dégagement de CO_2 .
- 2.** Il faudrait une source d'énergie décarbonnée, générant de très faibles émissions de CO_2 .

E. Quelles sont les avancées technologiques récentes dans l'industrie du verre ?

- 1.** Les ions Li^+ sont attirés vers la borne négative du générateur donc ils se déplacent de la contre-electrode vers l'électrode de travail.

2. L'électrode de travail est du côté de la borne négative du générateur donc elle reçoit des électrons. Il s'agit donc d'une réduction ($\text{ox} + n \text{ e}^- \rightarrow \text{red}$).

3. À la contre-electrode, il ne peut s'agir que d'une oxydation (toujours couplée à une réduction).

4. Il y a de grandes similitudes entre les deux procédés :

- Pour le toit d'une voiture : lorsqu'une tension électrique n'est pas appliquée, les colorants s'orientent indifféremment et bloquent en partie le rayonnement. Si on applique une tension électrique, ils s'orientent tous dans la même direction rendant possible le passage du rayonnement.

- Pour la paroi de douche : Lorsqu'une tension électrique n'est pas appliquée, les cristaux liquides s'orientent indifféremment et bloquent en partie le rayonnement. Si on applique une tension électrique, ils s'orientent tous dans la même direction rendant possible le passage du rayonnement.

ORIENTATION ET MÉTIERS

Partie orientation proposée et rédigée par Françoise Brénon
et Gérard Roussel (Mediachimie)

Dans le domaine de l'habitat, au cœur des bâtiments et de tous leurs matériaux, l'innovation est permanente bien qu'elle ne soit pas nécessairement visible. Ces innovations concernent aussi bien la structure de base que l'ensemble des équipements techniques et de confort. Nous nous intéresserons ici aux innovations les plus récentes, le tout dans une démarche d'économie circulaire en recyclant et valorisant déchets et produits en fin de vie **au moyen entre autres de procédés chimiques**.

Les grands enjeux pour l'habitat et la construction sont la résistance et la durabilité en particulier des structures dont le béton est généralement l'élément principal.

On travaille aujourd'hui à la production de **bétons bas carbone ou bétons polymère ou de résine** afin de réduire l'empreinte carbone et améliorer leur résistance. Mais il existe aussi des **bétons luminescents** qui absorbent les UV le jour et les restituent la nuit ou des **bétons translucides** contenant des fibres optiques pour réduire l'éclairage artificiel (en cours de développement). Des projets pilotes ont été initiés avec des **bétons auto-réparants ou auto-cicatrisants** basés sur l'ajout de polymères ou de bactéries.

L'isolation et les économies d'énergie font aussi l'objet de nouvelles approches avec l'utilisation d'**aérogels** à base de silice ou de polymères, d'isolants biosourcés (laine de bois, ouate de cellulose, liège) traités chimiquement contre le feu et l'humidité. Il existe également des **peintures thermiquement isolantes** à base de microbilles de verre ou de céramiques. Plus récemment, des pilotes ont été lancés dans le cadre de l'utilisation de **matériaux à changement de phase (MCP)** afin de stocker la chaleur le jour et la libérer pendant la nuit alors qu'il fait plus froid.

Les vitrages intelligents concourent au confort et à la gestion de l'énergie et de la lumière. **Vitres électrochromes, thermochromes, photochromes, à cristaux liquides, à opacité variable, connectées**, autant de technologies que d'applications spécifiques.



Verres techmochromes © iStock

La gestion de l'énergie peut se faire à l'aide de **panneaux photovoltaïques**, de **batteries domestiques** et celle de l'eau en filtrant celle-ci avec des **membranes polymères**, du charbon actif ou des **nanofiltres**.

Toutes les conceptions de différents matériaux de l'habitat font appel à des procédés chimiques et aux compétences des chimistes.

Pour découvrir certaines de ces réalisations, visionnez les conférences du colloque [Chimie et habitat](#) de novembre 2025 et consultez également la sélection ci-dessous.

- **Les vidéos**

[La peinture qui dépollue](#) Collection Idée plein la tech

[L'intelligence du verre](#) Collection Idée plein la tech

[L'architecture bois-sourcée](#) Collection Idée plein la tech

[Les industriels à la recherche d'alternatives au clinker, ingrédient peu connu mais très polluant du ciment](#) Prix des jeunes journalistes 2024

- **Les ressources**

[Zoom sur la formulation des bétons et des ciments](#)

[Zoom sur les progrès de l'optoélectronique : des LED aux OLED](#)

[Zoom sur l'éco-conception des produits de consommation : vers une économie circulaire. Exemple des peintures](#)

Les chimistes, du Bac au Bac+8, sont spécialisés : en science des matériaux, bétons classiques et bétons innovants, chimie des polymères, chimie verte, économie circulaire, écoconception, matériaux intelligents, chimie de l'environnement, analyse, formulation, corrosion, électrochimie, chimie des batteries, génie des procédés, chimie industrielle.... La part d'innovation est importante dans un contexte de durabilité, de transition énergétique, d'économie circulaire, de produits de construction bas carbone, de qualité de vie.



Un étudiant pendant la semaine d'étude «Chimie et sciences des matériaux». © Sciences et les jeunes

Ci-dessous une sélection de ressources relatives aux formations et métiers concernés :

- Parmi les fiches « Les chimistes dans... »

[Les chimistes dans : L'aventure des nouveaux matériaux](#)

[Les chimistes dans : Les énergies nouvelles face au développement durable](#)

[Les chimistes dans : les métiers de l'eau](#)

[Les chimistes dans : l'économie circulaire](#)

- Parmi les fiches métiers

[Technicien matériaux \(H/F\)](#)

[Ingénieur matériaux \(H/F\)](#)

[Technicien de formulation \(H/F\)](#)

[Ingénieur en formulation / formateur \(H/F\)](#)

[Technicien génie des procédés / génie chimique \(H/F\)](#)

[Ingénieur chimiste procédés \(H/F\)](#)

[Technicien de fabrication production \(H/F\)](#)

[Ingénieur de recherche / chercheur \(H/F\)](#)

[Technicien chimiste \(H/F\)](#)

[Technicien d'analyse chimie / physico-chimie \(H/F\)](#)

.....

- Les formations

[Bac +2/3 : vers les métiers de techniciens et de techniciennes](#)

[Bac +5/8 : vers les métiers d'ingénieur\(e\)s et de recherche](#)