

Recyclage du verre plat

Jean-Christophe Arnal, docteur en génie des procédés¹ et directeur de l'usine de fabrication du verre plat sur le site Saint-Gobain d'Aniche-Émerchicourt.

Introduction

Nous allons commencer par une introduction sur le verre : qu'est-ce que le verre, comment le fabrique-t-on, quels sont les polluants associés, et comment les appelons-nous ? Ensuite, nous aborderons la collecte du verre plat, en faisant un parallèle avec l'emballage, notamment les bouteilles. Enfin, on donnera des informations sur le processus de recyclage du verre plat, avec un point sur la Responsabilité élargie des producteurs (REP²).

1. Discipline visant à concevoir, optimiser et contrôler les opérations industrielles.

2. Responsabilité élargie des producteurs : principe selon lequel les producteurs sont tenus responsables de la gestion des déchets générés par leurs produits tout au long de leur cycle de vie.

1 Le verre et sa fabrication

1.1. Qu'est-ce que le verre plat ?

Le verre est un solide obtenu par le refroidissement rapide d'un mélange de dioxyde de silicium et de fondants à l'état liquide. Il s'agit d'un matériau amorphe ; il n'y a pas de phase cristalline interne. Le verre qui nous intéresse ici est le verre sodocalcique donc à base de soude. Il existe différents types de verre, celui-ci est utilisé à la fois pour le verre plat, l'emballage (bouteilles) et dans une certaine mesure pour les fibres d'isolation (**Figure 1**).

Les principaux matériaux de structure constituant les verres sodocalciques sont la silice, l'alumine, le calcium, la



Figure 1

Deux exemples d'utilisation du verre sodocalcique, panneaux de verre plat en sortie d'usine ; bouteilles.

magnésie et la soude. Les deux principaux restant la silice, le matériau de base, et la soude, utilisée comme fondant³ pour diminuer les températures de fusion du procédé et permettre ainsi des économies de gaz. La **Figure 2** indique les compositions de ces matériaux dans les verres sodocalciques.

À ces matériaux sont ajoutés des colorants, essentiellement du **fer**, du **cobalt** ou du **sélénium**, dont les quantités, beaucoup plus faibles, s'expriment en ppm⁴ (gramme par tonne). Le fer produit essentiellement des couleurs vertes, mais peut aussi tirer vers le jaune ou le bleu. Le cobalt donne une teinte bleue, et le sélénium, rouge. Chaque produit a une cible colorimétrique

qui lui est dédiée, visible ci-après (**Figure 3**). L'impact du colorant peut être observé en examinant la tranche du verre, en raison de l'effet de la transmission. Si vous prêtez attention aux verres que vous avez chez vous, ils sont généralement légèrement verdâtres même s'ils semblent clairs et transparents.

Le verre est un matériau recyclable à l'infini car il n'est pas dégradé par les opérations de recyclage : même qualité optique, même performance mécanique, même durabilité. Si l'on prend une plaque de verre, qu'on la casse et qu'on la remet dans le four pour fusion, on retrouve une plaque de verre identique.

On distingue deux types de recyclage pour le verre plat dans l'industrie verrière :

1) pour refaire du verre plat, donc en boucle fermée (économie circulaire) ;

	Verre sodocalcique
SiO ₂	60-75 %
Al ₂ O ₃	1 %
CaO	5-12 %
MgO	4 %
Na ₂ O	12-16 %

Figure 2

Composition de base du verre sodocalcique (en %).

3. Substance utilisée pour abaisser le point de fusion d'un mélange, souvent dans la métallurgie.

4. Partie par million (0,1 % équivaut à 1 000 ppm).

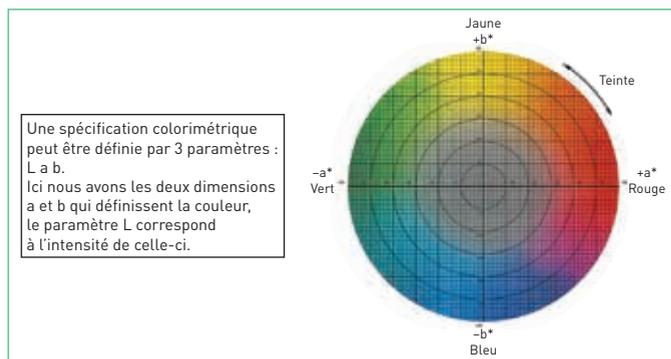


Figure 3

Paramètres a et b d'une cible colorimétrique (référentiel L a b).

2) pour fabriquer des bouteilles ou des fibres d'isolation ; pour ces opérations, il peut être mélangé à du verre cassé de toutes origines.

1.2. Comment fabriquer le verre plat ? (Figure 4)

Pour fabriquer du verre plat, on commence par assembler des matériaux de base : principalement le sable, le calcaire, la dolomie⁵, le carbonate de soude. On ajoute ensuite du calcin (c'est-à-dire des morceaux de verre provenant d'objets cassés de différentes origines). On soumet ensuite ce mélange à une étape de fusion, essentiellement par la combustion de gaz naturel. Pour un site de verre plat, la température du four est de l'ordre de 1 500 °C et l'opération représente 90 % de la consommation énergétique du site. Un ordre de grandeur important : le

débit de verre pour une ligne de verre plat est d'à peu près 600 tonnes par jour, ce qui représente autour de 200 000 tonnes par an de production de verre plat.

La fusion produit un liquide que l'on vient ensuite former. Ceci se fait en déposant le liquide à la surface d'un bain d'étain en fusion. Comme de l'huile sur de l'eau, il flotte, puis on l'étire par un rouleau à la sortie du bain. Il se comporte comme du chewing-gum : plus on tire fort, plus la couche va être mince au milieu, moins on tire fort, plus elle va être épaisse. Afin d'avoir un bon profil d'épaisseur, on a des équipements sur le côté, les *top rolls*⁶, qui vont venir tirer le bord de la feuille de verre ou la repousser au milieu, afin d'avoir un profil d'épaisseur constant sur toute la largeur du verre. Quand on fait fonctionner la *top roll*, qui est une roue dentée, on entame le verre et on génère du déchet obligatoire.

5. Roche carbonate contenant du magnésium, utilisée comme matière première dans l'industrie des matériaux de construction.

6. Rouleaux supérieurs.

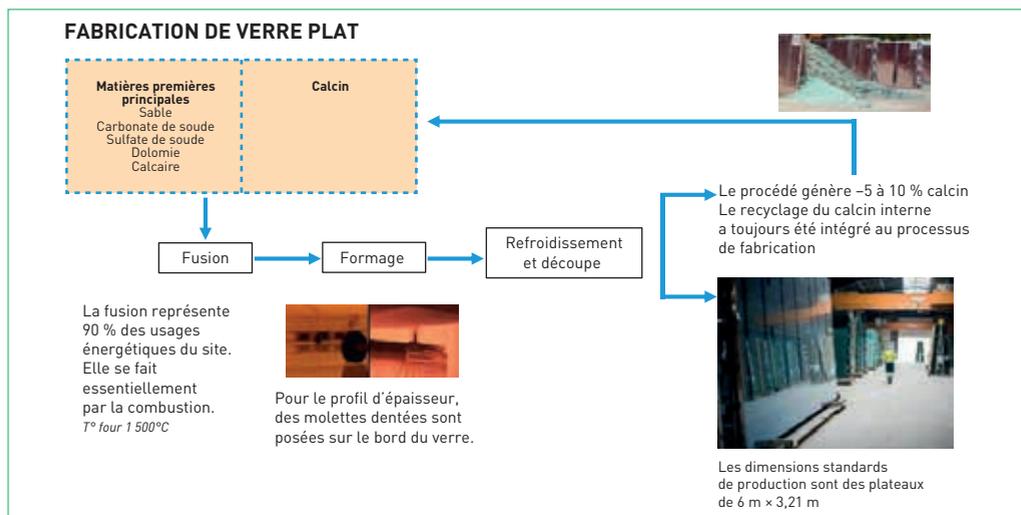


Figure 4

Processus de fabrication du verre plat.

La phase suivante est le refroidissement et la découpe en plaques de tailles standardisées. Un plateau de verre standard mesure 6 mètres par 3,21 mètres, à peu près 20 m², et on produit des piles de plateaux qui vont de 3 à 10 tonnes suivant les clients. Une deuxième sortie du procédé correspond aux pertes générées par les opérations : les traces des marques des *top rolls* ainsi que les effets de corrections de défauts exigées par la qualité voulue du verre final. Ceci génère donc déjà 5 à 10 % de calcin sur notre procédé. Généralement, une ligne de verre clair va avoir entre 5 et 20 % de calcin qu'elle va utiliser en boucle fermée, c'est ce qu'on appelle le calcin interne (Figure 4).

1.3. La réutilisation du calcin

Pour fabriquer une tonne de verre sans utiliser de calcin,

on utilise 1,2 tonne de réactifs : du sable, du carbonate de soude, du calcaire, dolomie, feldspath⁷ ou autres. La combustion fait qu'environ 20 % de la masse des réactifs est évacuée sous forme d'émissions de CO₂ provenant essentiellement du carbonate de soude et du calcaire.

En revanche, quand on utilise du calcin, on n'utilise pas toutes ces matières premières et, par ailleurs, on a besoin de moins d'énergie pour la fusion. Cela diminue les émissions de CO₂ pour l'étape de fusion (Figure 5).

L'utilisation de calcin permet de diminuer l'utilisation de matières premières, dont on sait qu'elles sont aujourd'hui « en tension ». Un ordre de grandeur : une ligne de

7. Minéral silicaté abondamment utilisé dans la fabrication de céramiques et de verre.



Figure 5

Impact environnemental du recyclage du verre dans les deux voies – avec ou sans calcin.

600 tonnes de verre par jour demande 2 300 tonnes de sable par semaine. C'est du sable de carrière, du calcaire de carrière, de la dolomie de carrière... Par l'utilisation du calcin, la tension sur les matériaux de carrière est fortement allégée. Il en est de même de la tension sur l'environnement, l'utilisation du calcin permettant de réduire la consommation énergétique et donc l'impact final, l'émission de CO₂.

Le calcin présente en revanche certains inconvénients dus à la présence des impuretés qui le polluent. Elles peuvent impacter à la fois la couleur, les propriétés optiques ou la présence de défauts, solides ou gazeux. Il est difficile de contrôler finement le calcin lors de sa réception. Nos procédés à base de calcin sont typiquement dimensionnés à 120 tonnes par jour. Ils viennent par arrivages de camions de 20 tonnes, des volumes importants qui impliquent que la ségrégation et le contrôle soient réalisés en amont.

1.4. Les polluants du calcin

Abordons quelques types de pollution du calcin.

L'exemple de la vitrocéramique. La vitrocéramique n'est pas vraiment du verre : elle fond à 1 700 degrés environ, mais si on en recycle un morceau, on s'aperçoit qu'on n'arrive pas à le fondre. Des défauts restent au milieu de la plaque et il devient donc un infondu.

Le cas de l'aluminium. Dans nos opérations, il ne provient pas de canettes, mais souvent des séparateurs en aluminium situés entre les plaques de verre dans le double vitrage. Suivant les cas, on se retrouve avec des baguettes ou des morceaux de baguettes d'aluminium et l'aluminium réagit pendant la fusion. Il cause une réduction locale de la silice qui produit du silicium métal sous forme de billes ainsi qu'un dégagement gazeux important. On a donc là une crise à la fois solide et gazeuse (Figure 6).

Bien sûr, il y a d'autres types de pollution... les porcelaines, les



Figure 6

Exemples de pollution par la vitrocéramique (gauche) et par les billes de silicium (droite) formées par l'aluminium (milieu).

métaux, les meules abrasives, les pierres, le blé, tout ce qui est végétal qui peut nous arriver par les transports en camions.

Pourquoi une pollution est-elle problématique ? Dans un four de verre en fusion, on a à peu près 1 200 tonnes de verre pour un débit de l'ordre de 600 tonnes par jour. Avant le début de la perception d'une crise de pollution, il se passe 7 à 10 heures. Ensuite il faut plusieurs jours de temps de purge (Figure 7). Pendant 3 à 4 jours on ne produit donc rien. Les effets dépendent des types de crises : par exemple, si on prend une meule abrasive qui va passer au milieu du verre en fusion, on ne peut pas fondre les grains de corindon qui vont donc être recyclés à travers le calcin. On sera obligé d'isoler toute la partie de calcin produite à ce moment-là ; elle sera perdue car on ne sera pas capable de la fondre de nouveau.

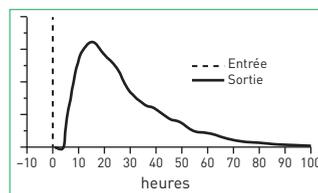


Figure 7

Flux d'entrée et de sortie d'un réacteur déclenché par une crise de pollution.

2 La collecte du verre

2.1. L'exemple de l'emballage

Un exemple de collecte du calcin est l'emballage : tout ce qui est bouteille, pot, flacon... Cette collecte a démarré dans les années soixante-dix, juste après le premier choc pétrolier. Pourquoi ? Parce que plus de calcin, c'est moins d'énergie dépensée ; il y avait donc vraiment un gain sur le sujet. En 2019, les acteurs de la chaîne se sont réunis et ont défini un projet pour aller vers 90 % de réutilisation du verre d'ici 2025 et 100 % en 2029. Ce sont de vrais défis puisqu'on n'est aujourd'hui qu'à 76 % de recyclage sur l'emballage.

La collecte est faite essentiellement par vous et moi, c'est le consommateur qui choisit sa poubelle et place sa bouteille à l'intérieur. Il y a eu un certain nombre de campagnes de sensibilisation ainsi que des démarches personnelles vers le recyclage des déchets ainsi qu'un maillage important des points de collecte : tout le monde a un point de collecte à côté de chez soi ou une poubelle qui y est dédiée (Figure 8).

Le calcin collecté est ensuite trié manuellement, mécaniquement, avec l'aide de détecteurs de métaux, de tris optiques, puis envoyé vers le



Figure 8

Point de collecte de verre.

point de la chaîne de recyclage où l'on fabrique les bouteilles, « l'usine de fonte de verre ». Un des problèmes du tri du calcin est que plus on le transporte et plus il va se casser, et fournir finalement des fines de calcin, des petits morceaux de quelques millimètres sur lesquels les détecteurs de métaux – et donc les tris – seront moins efficaces ; idem pour les tris optiques qui deviennent inopérants en dessous d'une certaine dimension. On n'est donc pas capables de connaître la composition des fines avec exactitude.

2.2. Le cycle de vie du verre plat

Le cycle du verre plat est présenté en **Figure 9**. Il distingue tout d'abord **une partie production** avec le calcin interne liée au processus. Vient ensuite

la partie « transformation » où sont formés les plateaux de 6 m par 3 m 21, dans lesquels les clients vont découper une fenêtre, une porte ou un vitrage. Les chutes de ces opérations fournissent des résidus

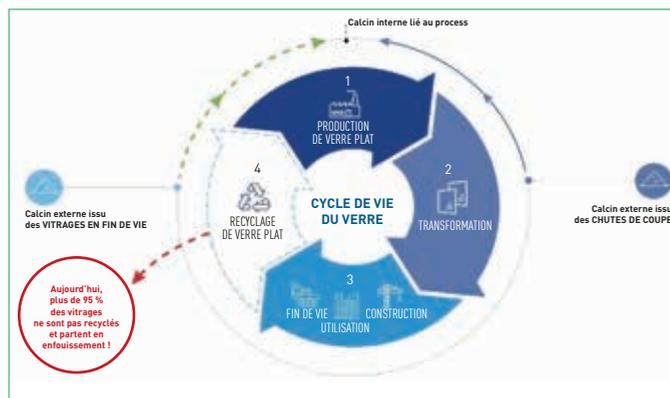


Figure 9

Cycle de vie du verre plat.

de coupes qui **constituent le « calcin externe »**. Ensuite interviennent les **parties de « construction » puis d'« utilisation »** dans lesquelles on installe la fenêtre, la porte ou le vitrage. Puis vient une **partie « fin de vie »** où l'on démolit ou change sa fenêtre en retirant l'ancien vitrage. **Enfin vient la partie « recyclage »** : on a retiré le vitrage, on récupère la vitre et on la renvoie vers l'usine de verre plat.

En 2020, seulement 5 % de verre était récupéré : le calcin en fin de vie. Le reste partait essentiellement en enfouissement. Au moment de la démolition, tout est mélangé : on ne fait pas le tri, on ne va pas chercher le verre, on casse tout pour l'enfouir. Sur les 5 %, le calcin de fin de vie, une bonne partie part sur la partie

emballage. La plus grande partie du verre récupéré vient donc de la collecte où se trouve la vraie difficulté pour le verre plat. Le calcin doit être propre pour être recyclé : un plateau de verre pèse entre 200 et 500 kg, et **quelques milligrammes de pollution au milieu obligent à casser le plateau**. Il faut donc qu'il soit propre et pour cela, il faut que l'intégrité du vitrage soit maintenue jusqu'au moment où l'on va commencer la partie recyclage.

2.3. La collecte du verre plat

La *Figure 10* présente quelques exemples de collectes : dans des bennes où le vitrage est maintenu constamment soit horizontalement, soit verticalement. Si les bennes arrivent



Figure 10

Exemples de collectes conformes et non conformes.

sous le format représenté sur les deux photos de droite, on ne pourra pas les recycler parce qu'on ne sera pas capable de les nettoyer correctement pour les amener sur un calcin recyclable par la suite.

La difficulté par rapport à l'emballage est que la collecte est réalisée par l'installateur, le cureur⁸ ou l'entreprise de dépose. Puisqu'il s'agit d'entreprises, se pose la question du coût des opérations : à quel point l'entreprise est-elle motivée pour venir séparer ce verre pour effectuer le tri du matériau, par rapport à un coût de simple mise en décharge. Aujourd'hui, un réseau de collecte est encore manquant. Cependant la situation est en cours de formalisation : il y a un besoin de structurer économiquement la filière, d'où la mise en place de la REP PMCB en France.

2.4. La mise en place de la Responsabilité élargie aux producteurs (REP)

Cette REP est très importante, car c'est elle qui va vraiment permettre le lancement de la filière. En 2017 a été voté un engagement pour la croissance verte relatif au recyclage du verre plat. Comme on l'a vu, il a finalement eu des effets moyens mais a permis de poser les filières, de comprendre quel était le marché et de savoir où on en était. En 2021 a été créée par décret la REP, une Responsabilité élargie aux producteurs pour la gestion des ressources naturelles et la collecte de tous

les déchets du bâtiment, avec la hiérarchisation des traitements pour les Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment (PMCB). Elle concerne les matériaux de construction avec des sous-classes qui permettent de définir comment on doit les gérer. Des éco-organismes ont été définis et agréés et début 2023, le démarrage opérationnel de la filière a pu être acté.

Résumé de la REP. Elle part du « metteur au marché », la personne qui fabrique la vitre et va ensuite la vendre ; elle paye un éco-organisme à l'aide d'une éco-contribution, similaire, par exemple, à ce que l'on pratique pour l'électroménager. Ensuite, il y a l'installation du produit, puis la dépose par le détenteur du déchet, pour la filière, c'est généralement l'installateur au moment du remplacement ou le démolisseur, et enfin la gestion de fin de vie du produit. À ce moment-là, on a une reprise gratuite du déchet si les règles de tri ont été respectées, c'est-à-dire qu'on ne casse pas le verre mais on le remet sur châssis. L'éco-organisme va alors subventionner la déchetterie, le point d'enlèvement ou le collecteur, afin de séparer le verre, le placer proprement dans les bonnes bennes et retirer toute la partie encadrement de vitrage. Le déchet est ensuite envoyé vers le recycleur associé au « traiteur », qui vont fondre ce verre et le réutiliser.

Il ne faut pas oublier le rôle du « traiteur » qui est chargé de séparer les types de verre : le vitrage, les portes vitrées mais également d'autres types de verre. Il faut également retirer

8. Préparateur en démolition de bâtiments.

le vitrage de son cadre, broyer, cribler⁹ si besoin, alors que le recycleur, c'est celui qui va réutiliser.

2.5. Les types de vitrages utilisables

Quatre types de vitrage ont été identifiés pour faire un recyclage propre en boucle fermée.

La première catégorie est le vitrage clair ou extra-clair. On regroupe ici tout ce qui est simple vitrage, recuit ou trempé, il n'y a pas de différence. Dans un substrat clair ou extra-clair, selon le taux de fer à l'intérieur du verre, on va avoir des couleurs différentes : il y a deux gammes, une gamme qui est dite « diamant », extrêmement claire, et une autre « standard », qui est simplement claire et comporte ou non plusieurs couches. Les couches peuvent par exemple avoir été déposées par magnétron¹⁰ à la surface du verre pour donner des propriétés de contrôle solaire thermique. Il n'y a pas de problème de recyclage non plus pour les vitrages isolants comme le double vitrage.

La deuxième catégorie de verre est le vitrage teinté. On peut colorer le verre en bleu, en rose, en vert, en agissant sur un certain nombre d'oxydes métalliques. Il convient de séparer ces verres-là du verre blanc, parce qu'ils pollueraient le verre

blanc par les colorants et leur donneraient une teinte bleutée ou rosée, ce qui n'est pas acceptable. On a donc d'un côté le verre blanc et de l'autre côté les verres teintés. Globalement, on peut recycler ces verres suivant leur type de colorant dans des verres adaptés. Avec un verre rouge, on va pouvoir mettre du rouge, un verre bleu, on va pouvoir mettre du bleu, et un verre vert, on va prendre un verre vert. Si jamais il y a une pollution de verre teinté à l'intérieur du verre clair et qu'il est réutilisé, il y aura une dérive de la couleur et la couleur finale sera altérée.

Tout ce qui est miroir, vitrage émaillé ou laqué, peut également être recyclé dans les mêmes installations. Il faut juste vérifier le type d'émail qui est appliqué et l'utiliser en concentration faible pour s'assurer qu'il n'y a pas de montée de défauts. C'est **la troisième catégorie** de verre.

Quant au verre feuilleté, **la quatrième catégorie** de verre, ce sont deux plaques de verre mises en sandwich autour d'une couche de PVB¹¹. Après l'assemblage, l'ensemble est mis à cuire et passé à l'autoclave pour enlever les bulles. C'est le verre de sécurité, aussi utilisé pour le confort acoustique. Pour le recyclage, on doit prétraiter ce « sandwich » et on va le broyer, séparer le PVB et le verre. Le verre, on le réutilise directement, le PVB est envoyé vers des chaînes de valorisation dédiées. Même s'il reste un peu de PVB sur le verre, on est capable de le refondre.

9. Processus de séparation de particules indésirables du verre lors de sa production.

10. Type de cathode qui génère un champ magnétique et est souvent utilisé dans les procédés de dépôt physique en phase vapeur (PVD) pour appliquer des revêtements minces sur divers substrats, tels que le verre.

11. Poly(butyl acrylate), polymère thermoplastique de synthèse utilisé entre autres pour assembler les verres et fabriquer du vitrage feuilleté.

Conclusion

La difficulté pour le verre plat, c'est la collecte. C'est le point critique, car il faut avoir une qualité de verre très propre. On ne peut pas accepter de pollution à l'intérieur et chaque membre de la filière de traitement doit s'obliger à respecter un certain nombre de règles de tri. La REP a donné un cadre pour définir le travail et tout un réseau de collecte est en train d'être organisé pour le recyclage en fin de vie.

De nombreuses initiatives de sensibilisation des acteurs ont été menées, essentiellement auprès des industries de démolition et d'un grand nombre d'artisans. **Le verre, en tant que matériau recyclable à l'infini, est un produit qui s'inscrit naturellement dans une économie circulaire** puisqu'on peut le recycler sans dénaturer le produit en lui-même.

