

LYCÉE ERMESINDE

MÉMOIRE

Le verre

Composition et fabrication

Est-ce que le verre a déjà atteint son plus haut potentiel ?

Je déclare sur honneur avoir développé et rédigé ce mémoire sans l'aide abusive d'autrui.

Chloé Royen

Table des matières

1	Introduction	5
2	Généralités du verre	6
2.1	Composants principaux	6
2.2	Familles de verre	7
3	Production naturelle	8
4	Production manuelle	11
4.1	Description d'un atelier	11
4.2	Verre creux	14
4.2.1	Soufflage de verre creux	14
4.2.2	Coulage de verre creux	14
4.3	Verre plat	15
4.3.1	Soufflage de verre plat	15
4.3.2	Coulage de verre plat	16
5	Production industrielle	17
5.1	Verre creux	17
5.1.1	Verre creux moulé	17
5.1.2	Verre creux étiré	20
5.2	Verre plat	21
5.2.1	Procédé Twin	21
5.2.2	Procédé de laminage	22
5.2.3	Procédé Float	22
5.2.4	Procédé par étirage vertical	22
5.3	Fibre de verre	24
6	Transformation	26
6.1	Miroir	26
6.2	Vitrage isolant	27
6.3	Vitrage actif	27
6.3.1	Verre électrochrome	28
6.3.2	Vitrage à occultation	30

6.3.3	Vitrage chauffant	30
6.4	Verre trempé	30
6.5	Pare-brise	32
7	L’atelier de Christophe Genard	33
8	Crise du sable	42
9	Conclusion	44
10	Bibliographie	45
11	Remerciement	52

Chapitre 1

Introduction

Le verre est une matière que l'on rencontre régulièrement dans notre quotidien : le verre d'eau du matin, les lunettes, l'écran du téléphone, les fenêtres, les vases, les bouteilles, le matériel de laboratoire, etc. Mais de quoi est-il composé ? Comment est-il fabriqué ? De nos jours, le verre est considéré comme une des alternatives au plastique. Mais plus intéressant et peu connu, il se trouve aussi dans la nature.

Alors, pourquoi ai-je écrit un mémoire sur le verre ?

Plus tard, j'aimerais étudier l'ingénierie en génie civil. Je souhaitais donc un sujet qui concerne la construction de bâtiments. Mon premier choix a été l'histoire de la construction de maison, mais le sujet était bien trop vaste. J'ai donc décidé de me concentrer sur un matériel comme le béton ou le verre et j'ai choisi ce dernier. Je trouve le verre plus intéressant que le béton. En effet, le verre est aussi utilisé dans d'autres domaines que la construction et peut être trouvé dans la nature, par exemple dans une éponge au squelette en verre.

La question à laquelle j'essayerai de répondre tout au long de ce mémoire est la suivante : Est-ce que le verre a déjà atteint son plus haut potentiel ? C'est une question fascinante étant donné que le verre est partout présent dans notre vie quotidienne. Et nous partons souvent du principe que tout peut-être amélioré et donc que les limites d'un matériel sont à dépasser sans cesse. Voilà pourquoi les laboratoires de recherche existent et nous font avancer.

Je parlerai dans ce travail des composants du verre, des procédés de fabrication naturelle, manuelle ainsi qu'industrielle, puis de sa transformation. Avant de conclure, j'aborderai encore la crise du sable ainsi que mon expérience pratique lors d'un stage où j'ai pu produire deux objets en verre.

Chapitre 2

Généralités du verre

Le verre est un produit minéral de la nature qui est dur, fragile, isotrope¹, transparent à la lumière visible et inerte.

L'industrie du verre est divisée en deux secteurs, d'un côté le verre industriel et de l'autre, le verre artisanal. Les deux secteurs ont différentes utilités. Le verre industriel est produit en masse alors que le verre artisanal est plus décoratif et plus prestigieux.

Pour le verre industriel, trois sous-catégories existent : le verre plat, le verre creux et la fibre de verre.

Le verre plat est utilisé pour le vitrage des habitations ou encore des automobiles, le verre creux comme emballage pour l'alimentaire et le domaine pharmaceutique ou encore le verre pour boire. Quant à la fibre de verre, elle est utilisée pour l'isolation, pour le renforcement des matières plastiques ou encore pour la distribution d'Internet.

Le verre artisanal est souvent utilisé dans l'art où des pièces en verre hors norme sont utilisées, sinon en général le verre artisanal n'existe plus beaucoup.

2.1 Composants principaux

Le verre est composé de trois éléments principaux : le vitrifiant, le fondant et le stabilisant. Le fondant et le stabilisant sont variables en fonction du type de verre que l'on veut obtenir.

Vitrifiant

Le vitrifiant est toujours de la silice, c'est-à-dire le dioxyde de silicium (SiO_2) qui est présent en grande quantité dans le sable. Les sables les plus purs peuvent en contenir jusqu'à 99%. L'industrie du verre utilise en grande quantité de la silice venant des carrières.

Le dioxyde de silicium représente 70% de la composition du verre. Lors de la fabrication du verre, si sa quantité augmente, alors la dureté du verre augmentera également, le verre devient donc encore moins déformable. La température de fusion du dioxyde de silicium est de 1730 °C, ce qui est extrêmement haut et donc demande beaucoup d'énergie. On veut donc diminuer cette température et pour cela on ajoute le fondant au mélange du verre.

Fondant

Le fondant peut réduire la température de fusion jusqu'à 1400 °C. Donc moins d'énergie nécessaire et il est plus facile de travailler la matière.

Différents composés peuvent être utilisés comme fondant. L'oxyde de sodium (Na_2O) est le plus souvent utilisé. Mais le natron, qui est une variété naturelle de carbonate de sodium (Na_2CO_3) et qui contient de la

1. Les propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions

soude, est également utilisé. Pour les verres à vitres, par exemple on a recours à l'oxyde de magnésium (MgO). Mais comme le fondant augmente la solubilité à l'eau, on utilise le stabilisant.

Stabilisant

Le stabilisant renforce et consolide le verre.

Le stabilisant le plus courant est la chaux (oxyde de calcium, CaO). Pour une teinte verdâtre, est ajouté fréquemment de l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Mais dépendant du degré d'oxydation du fer, cela peut donner une teinte bleue ou encore jaune. Pour un verre plus éclatant et plus facile à travailler, ce sera de l'oxyde de plomb (PbO).

2.2 Familles de verre

On distingue plusieurs familles de verre selon leur propriété ou encore leur composition.

Verre silico-sodo-calcique

Le verre silico-sodo-calcique est composé comme son nom l'indique de silice (SiO_2), de soude (Na_2CO_3) et de calcium (Ca). C'est l'un des verres les plus répandus comme dans le vitrage ou le mobilier.

Verre sodo-calcique

Le verre sodo-calcique représente 90 % de la production de verre, car c'est le verre utilisé pour les bouteilles, les flacons et des vitrages. Comme le nom l'indique, ce verre se compose principalement de silice (SiO_2), de calcium (Ca) et de sodium (Na). Le calcium et le sodium sont en général ajoutés au mélange sous forme de CaO et Na_2O .

Verre borosilicate

Le verre borosilicate se compose de l'anhydride borique donc B_2O_3 . Ce verre est plus résistant à la chaleur et est donc utilisé pour des récipients de laboratoire ou de cuisine.

Verre céramique ou vitrocéramique

Le verre céramique est composé de silice (SiO_2), de sel de titane et de l'oxyde de lithium (Li_2O). Il se retrouve dans des plaques de cuisson, des télescopes.

Verre au plomb

Le cristal ou le verre qui protège des rayons X (s'il contient 60% de plomb) fait partie du verre au plomb.

Chapitre 3

Production naturelle

Le verre a principalement été créé par l'homme. Cependant, le verre peut se trouver dans la nature provenant de différentes sources. Mais le verre naturel est extrêmement rare dû aux hautes températures nécessaires pour faire fondre la silice.

Il existe notamment du verre naturel formé lors d'une chute de météorite. Des fragments de roche terrestres sont vitrifiés à cause des fortes chaleurs du météorite. Par exemple, la moldavite est un verre que l'on trouve dans le sud de la République Tchèque et qui a été formé par la chute d'un météorite il y a 17 millions d'années. Le même météorite est à l'origine du cratère Nordlingen Ries en Allemagne.



FIGURE 3.1 – Morceau de Moldavite

Du verre naturel se forme également lorsque la foudre heurte un sol siliceux. La foudre fait fondre le sol qui par la suite se consolide. Ce verre, appelé fulgurite, n'est pas transparent dû à son impureté causée par les lieux environnants. La fulgurite est rugueuse et elle a la forme d'un tube. Quand la foudre heurte le sol, elle ne forme pas un seul chemin, mais une multitude. Ce schéma ressemble aux racines d'un arbre. Ces caractéristiques causent la ressemblance avec une racine fossilisée. Mais on arrive rarement à trouver un schéma entier de fulgurite et à l'extraire sans l'endommager. On en trouve donc souvent seulement en morceaux.



FIGURE 3.2 – Plusieurs fulgurites



FIGURE 3.3 – L'intérieur d'une fulgurite

Le verre naturel peut également avoir des origines volcaniques comme l'obsidienne. Elle se forme grâce à des coulées de lave riches en silice qui subissent un refroidissement rapide. Elle est aussi considérée comme roche, car elle se dévitriifie avec le temps et donc il n'existe pas d'obsidiennes datant avant l'ère cénozoïque. Cette ère a débuté il y a 66 millions d'années et est toujours en cours.



FIGURE 3.4 – Morceaux d'obsidienne

Le verre naturel peut encore avoir des origines dans le monde animal avec par exemple certaines éponges se fabriquant des squelettes en verre.

Ce qui est le cas pour l'euplectella Aspergillum, aussi nommée l'éponge à crevette. Elle vit dans des profondeurs de 35 à 5000 m dans le Pacifique Sud autour des côtes japonaises. Le squelette de l'éponge est en fibre de verre que l'éponge produit par elle-même. Le verre est formé par une protéine appelée silicatéine, elle facilite les réactions chimiques et les accélère également. Elle modifie la forme chimique de minéraux présents dans l'eau pour, par la suite les associer en bloc de molécules.

Le fait le plus étonnant concernant cette fabrication de verre est les températures dans lesquelles cela a lieu, car ce verre est créé avec des températures variant entre 0 et 30 °C. La structure formée a une résistance mécanique et une flexibilité très élevées. Le squelette se développe au niveau nanométrique sur plusieurs axes qui s'entremêlent et forment ainsi des faisceaux de fibres. L'éponge grandit en hauteur dans une forme cylindrique. Pour consolider cette structure, il y a aussi des faisceaux en oblique.

Les propriétés optiques de cette éponge sont exceptionnelles. Le transfert et le guidage de la lumière sont impressionnants. Les raisons de ces propriétés sont d'un côté les dimensions particulières (nanométriques) et de l'autre la perfection du verre à basse température qui ne présente aucune fissure. Ces caractéristiques permettent de diffuser de la lumière facilement, mais pas celle du soleil, car l'éponge vit trop éloignée de

la surface de l'eau. Cependant, elle diffuse la lumière des êtres vivants produisant leur propre lumière, par exemple le poisson pêcheur. Le fait de diffuser de la lumière lui permet d'attirer des ressources nutritives comme des bactéries photosynthétiques.



FIGURE 3.5 – L'euplectella aspergillum, l'éponge qui produit du verre

Chapitre 4

Production manuelle

Basé sur la découverte du verre décrite par Pline l'Ancien, le verre a été découvert près de l'Égypte par des marchands.

Ils se sont arrêtés pour la nuit sur le sable le long des rives du fleuve Belus. Ils ont fait un feu de camp entre des briques de natron. Le lendemain, les briques de natron s'étaient transformées, elles étaient devenues transparentes et dures. Ils ont également remarqué que le sable y était aussi pour quelque chose.

C'était la découverte du verre. Par la suite, pendant des années et des années, la recette pour fabriquer le verre a été améliorée ainsi que les techniques utilisées pour le modeler. Encore de nos jours, nous fabriquons des objets en verre de différentes formes dans des ateliers spécialisés.

4.1 Description d'un atelier

Un atelier de production manuelle de verre comporte plusieurs fours : le four de fusion (1), le four de travail (2), le four de recuisson (3) et le four pour les cannes (4).



FIGURE 4.1 – Première partie de l'atelier



FIGURE 4.2 – Deuxième partie de l'atelier

Dans le creuset¹ du four à fusion, on peut obtenir un verre liquide et donc façonnable. Dans le cas de l'atelier de Christophe Genard, dont je parlerai plus tard², ce four tourne en permanence à 1200°C. Dans le creuset¹ de ce four à fusion, le verre est introduit sous forme de grains composés de 70 % de sable, 30% de chaux et de produits chimiques améliorant certaines propriétés du verre.



FIGURE 4.3 – Le four à fusion



FIGURE 4.4 – Le four de travail



FIGURE 4.5 – Les grains qu'on met fondre dans le four

Le four de travail est un petit four qui tourne à 600°C. Il permet au maître verrier de réchauffer le verre qu'il façonne pour pouvoir mieux le travailler.

Le four pour les cannes est nécessaire pour chauffer les cannes (expliquer plus loin dans ce chapitre) pour qu'il n'y ait pas de choc thermique entre le verre (1200°C) et la canne (à température ambiante) lors de l'utilisation.

Le four de recuisson, comme le nom l'indique, permet de refroidir le verre progressivement pour qu'il ne casse pas.

Pour travailler le verre, on est assis sur un banc avec deux accoudoirs plus hauts que les bancs normaux pour pouvoir déposer la canne. La planche sur laquelle on est assis dépasse d'un côté pour pouvoir déposer les outils utilisés. Un seau d'eau se trouve toujours près du banc du côté où il y a les outils pour pouvoir y tremper les outils.

1. Partie inférieure d'un haut-fourneau, qui reçoit le verre en fusion

2. voir Chapitre 6 : L'atelier de Christophe Genard



FIGURE 4.6 – À gauche, le four pour chauffer les cannes et à droite, le four de refroidissement



FIGURE 4.7 – Le banc avec les outils, le seau

Quels sont les différents outils utilisés ?

Tout d'abord la canne : il s'agit d'une longue tige en métal creuse à l'intérieur pour tenir le verre. La canne est l'outil permettant de tenir le verre. Avec celle-ci est cueilli le verre dans le four de fusion. La canne doit toujours tourner pour garder le verre dans l'axe en son bout. Si l'on arrête de tourner la canne, le verre penche vers le bas et finit par tomber.

Ensuite la mailloche : elle sert à travailler le verre. C'est un outil en bois de poirier, celui-ci est très dense et se consume très lentement. La mailloche ressemble à une cuillère qui permet d'arrondir la masse de verre cueilli en forme de boule.

Puis la mouillette : c'est un tas de journaux mouillés qui forme une sorte de torchon et permet de former le verre un peu selon les envies.

Enfin, on utilise une série d'outils en métal comme des ciseaux ou encore des pinces. Ces outils servent différemment en fonction de la forme souhaitée.

4.2 Verre creux

Pour la production manuelle du verre creux, il existe deux techniques : le soufflage du verre et le coulage du verre.

4.2.1 Soufflage de verre creux

Pour obtenir manuellement un verre par la technique du soufflage, il faut suivre les étapes suivantes :

1. Cueillir du verre avec une canne
2. Former grossièrement le verre à l'aide de la mailloche.
3. Souffler dans la canne pour percer le verre.
4. Souffler de nouveau pour agrandir l'intérieur.
5. Aplatir la base.
6. Pincer le verre à l'endroit de l'ouverture de l'objet voulu.
7. Appliquer de l'eau sur la gorge qu'on a créée.
8. Mettre de la craie sur la base.
9. Prendre une deuxième canne.
10. Cueillir une petite quantité de verre.
11. Aplatir la base du verre sur la deuxième canne.
12. Placer la base de la seconde canne sur la base de la première canne.
13. Donner un petit coup à la première canne.
14. Mettre la première canne de côté.
15. Façonner l'ouverture avec différents outils.
16. Détacher le verre de la canne.
17. Mettre le verre dans le four à recuisson.

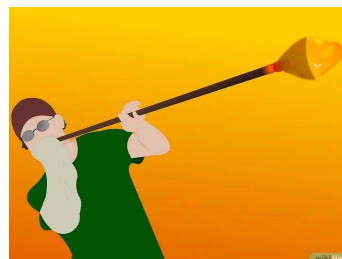


FIGURE 4.8 – Soufflage (point 3 et 4)

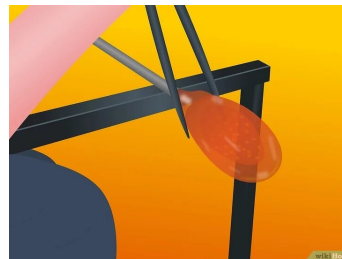


FIGURE 4.9 – Travail de la gorge (point 6)

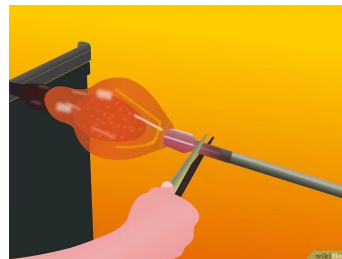


FIGURE 4.10 – Attachement de la deuxième canne (point 12)

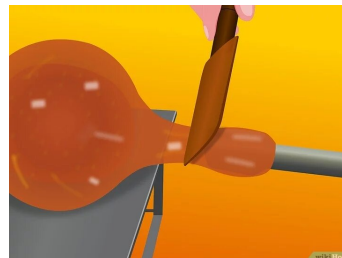


FIGURE 4.11 – Détachement du verre (point 16)

4.2.2 Coulage de verre creux

Le coulage du verre creux au niveau de l'artisanal est très simple. La démarche est la suivante :

1. Prendre du verre dans le four à fusion
2. Insérer le verre dans le moule
3. Laisser refroidir un peu
4. Enlever le moule
5. Mettre l'objet formé dans le four de recuisson

4.3 Verre plat

Lorsque l'on veut produire du verre plat manuellement, il existe deux techniques : le soufflage et le coulage.

4.3.1 Soufflage de verre plat

Pour le soufflage du verre plat, il y a deux techniques : le soufflage en couronne ou encore appelé le soufflage en plateau et le soufflage en manchon.

Soufflage en couronne

Pour le soufflage en couronne, il s'agit de former un globe creux qui est aplati en face de la canne, ensuite détacher la première canne et faire tourner le forme jusqu'à obtenir un plateau de verre rond grâce à la force centrifugeuse.

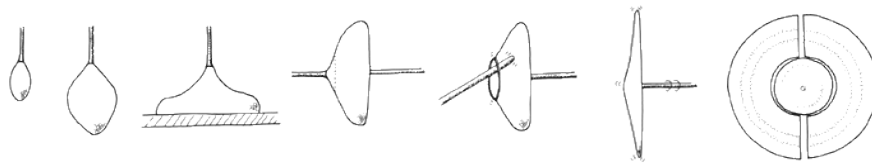


FIGURE 4.12 – Soufflage en couronne

Cette technique était une des caractéristiques des verriers du nord de la France au Moyen Âge.

Soufflage en manchon

Pour produire du verre plat par soufflage en manchon, il faut d'abord former un gros tube. On coupe les deux extrémités et ensuite on fend le tube sur toute sa longueur et on le déplie.



FIGURE 4.13 – Soufflage en manchon

Cette technique était caractéristique pour l'aire germanique.

4.3.2 Coulage de verre plat

Pour le coulage du verre plat, il suffit de faire couler le verre sur une surface plate comme une plaque métallique et de l'étaler correctement à l'aide d'un rouleau pour obtenir une épaisseur régulière. Comme le verre n'est pas assez lisse avec cette technique, il faut donc encore laminer (poncer) le verre plat.

Les Romains fabriquaient leur vitre de cette manière.

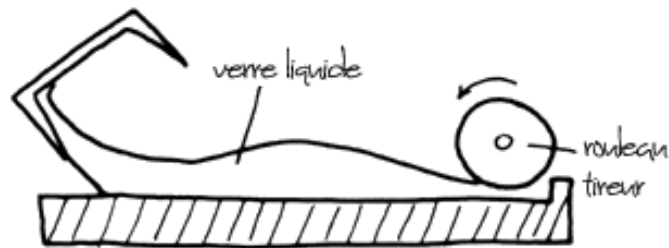


FIGURE 4.14 – Coulage de verre plat

Chapitre 5

Production industrielle

Étant donné que le verre est devenu une matière première dans la construction, la production de verre a donc été industrialisée que ce soit pour le verre creux ou pour le verre plat.

5.1 Verre creux

Le verre creux peut être façonné par moulage ou par étirage. Mais dans les deux cas, il existe plusieurs procédés pour le faire.

5.1.1 Verre creux moulé

Les procédés suivants sont similaires entre eux, mais chacun a ses avantages et inconvénients en fonction du produit désiré. Avec ces procédés, on produit des bouteilles, des bocaux, des verres à pied comme des verres à vin ou encore des verres sans traces de la production.

Procédé soufflé-soufflé

Ce procédé est utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles en verre. Il comporte comme le nom l'indique deux soufflages.

1. La paraison¹ entre dans le moule ébaucheur². Le moule fermé, l'air comprimé est injecté pour pousser le verre vers le bas. Le poinçon³ se trouvant à la base du moule perce alors le trou dans la matière. En injectant de l'air dans la matière pour la plaquer sur les parois du moule, le premier soufflage a lieu. Le moule est alors enlevé et l'ébauche⁴ est transférée dans le moule finisseur. Dans celui-ci, l'ébauche⁴ est à nouveau chauffée et s'allonge à cause de son propre poids.
2. Le deuxième soufflage ressemble fortement au premier. L'air est introduit par le haut et non par le bas où le trou du poinçon³ se trouve. Le moule finisseur donne alors à l'ébauche⁴ sa forme définitive. Lorsque le verre est suffisamment stable, le moule finisseur est retiré. L'ébauche⁴ qui est maintenant une bouteille est refroidie par un flux d'air de ventilation.

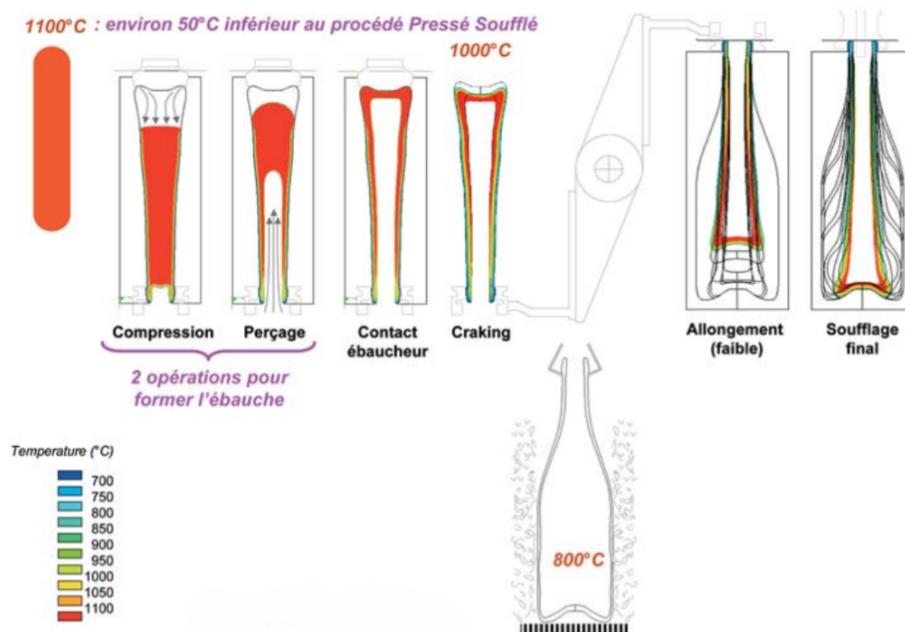


FIGURE 5.1 – Illustration du procédé soufflé-soufflé

-
1. Masse de verre fondu prélevée pour former un objet
 2. Moule métallique formant l'ébauche⁴
 3. Outil formé d'une pointe ronde effilée en acier, solidement emmanchée, et servant à percer des trous
 4. Première forme obtenue lors de l'exécution d'un objet

Procédé pressé-soufflé

Ce procédé est utilisé pour obtenir des objets avec de grandes ouvertures comme des bocaux. Le procédé pressé-soufflé ne comporte qu'un soufflage.

S'il ressemble fortement au premier, il ne comporte cependant pas le premier soufflage. Comme dans le premier procédé, la paraison⁵ entre par un entonnoir dans le moule ébaucheur⁶. L'entonnoir est remplacé par le haut du moule qui exerce une légère pression sur la paraison⁵. Puis le poinçon⁷ monte complètement et presse le verre pour qu'il remplisse l'espace entre le poinçon⁸ et le moule. Ensuite, le poinçon⁸ se retire et le moule est enlevé. Par la suite, le procédé est à nouveau identique au premier, l'ébauche⁸ est inversée et insérée dans le moule finisseur. L'ébauche⁸ s'allonge alors et est ensuite soufflée contre les parois du moule finisseur pour obtenir sa forme finale. Après le processus, le verre est extrait du moule et refroidi.

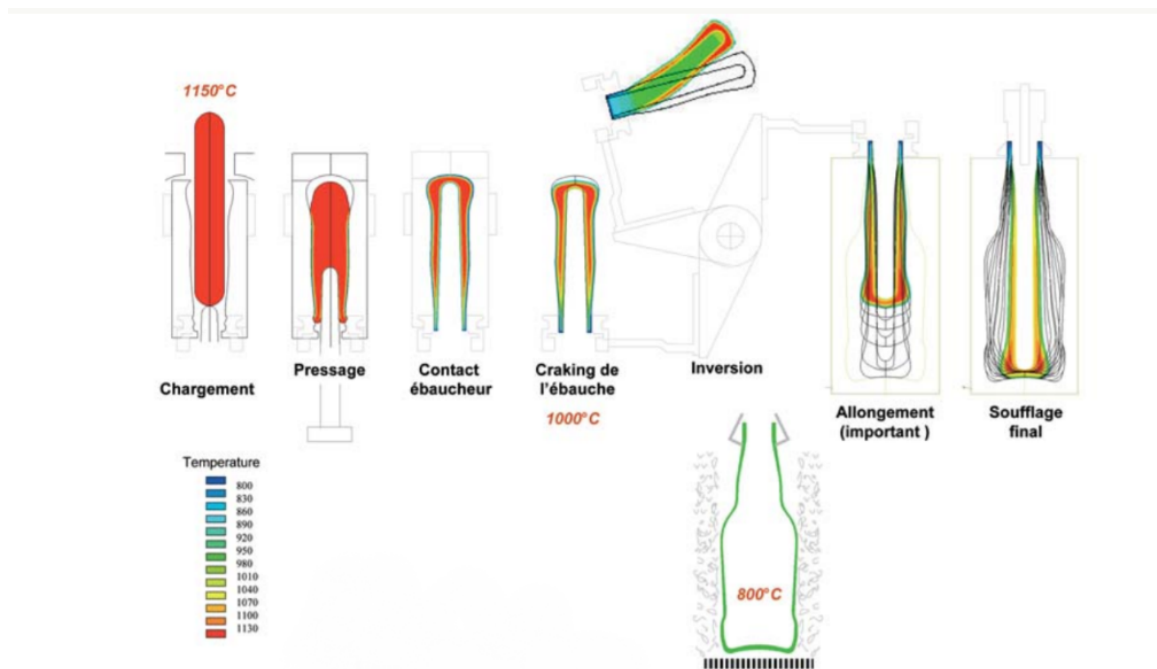


FIGURE 5.2 – Illustration du procédé Pressé-Soufflé

Procédé Pressé

Ce procédé est utilisé pour produire des gobelets.

Ce procédé est très simple. La paraison⁵ est introduite dans le moule, puis le poinçon descend pour former le verre. Ensuite, le poinçon se retire et le verre est extrait du moule et refroidit.

Procédé Hartford 28 Pressé-Soufflé-Tourné

Ce procédé est utilisé pour des verres à pied ou autres objets sans traces de moule. Il fonctionne de la même manière que le procédé pressé-soufflé, mais lors du soufflage dans le moule finisseur, l'ébauche⁸ est mise en rotation.

5. Masse de verre fondu prélevée pour former un objet

6. Moule métallique formant l'ébauche⁸

7. Outil formé d'une pointe ronde effilée en acier, solidement emmanchée, et servant à percer des trous

8. Première forme obtenue lors de l'exécution d'un objet

Comparaison des différents procédés

Afin de comprendre plus facilement tous les procédés, étudions ce tableau comparatif entre la formation de l'ébauche et la finition de l'objet en verre.

Procédés	Formation de l'ébauche	Finition
<i>Soufflé-Soufflé</i>	- compression du verre - pressage de l'ébauche - soufflage	- allongement naturel - soufflage
<i>Pressé-Soufflé</i>	- pressage par poinçon	- allongement naturel - soufflage
<i>Pressé</i>	- pas d'ébauche	- pressage par poinçon
<i>Pressé-Soufflé-Tourné</i>	- pressage par poinçon	- allongement naturel - soufflage avec rotation

Le procédé soufflé-soufflé s'adapte facilement à toutes les formes de bouteilles et l'intérieur du verre est sans défauts étant donné qu'il n'entre en contact avec aucun autre matériel comme du métal ce qui représente un avantage. En revanche, l'épaisseur du verre est plutôt irrégulière puisque seul l'air l'étale. Ce qui est l'avantage du procédé pressé-soufflé.

Un autre avantage du procédé pressé-soufflé est qu'il convient aux articles avec de larges ouvertures. En revanche, tous les objets ne peuvent pas être réalisés avec le procédé pressé-soufflé. Les objets hauts et étroits sont difficiles à réaliser, car leur géométrie complique l'élaboration du poinçon.

5.1.2 Verre creux étiré

Le verre creux étiré renvoie aux tubes en verre. Pour la création de ces tubes, deux procédés existent : le procédé Danner et le procédé Vello.

Procédé Danner

Le procédé Danner est utilisé pour obtenir des tubes de verre de différents diamètres et d'épaisseur fine.

Le verre en fusion est enroulé autour d'un mandrin⁹ légèrement incliné. Ainsi, le verre glisse vers le bas où un peu d'air est injecté dans le tube pour éviter son effondrement. Le tube est évacué par des rouleaux pour être coupé à la longueur voulue.

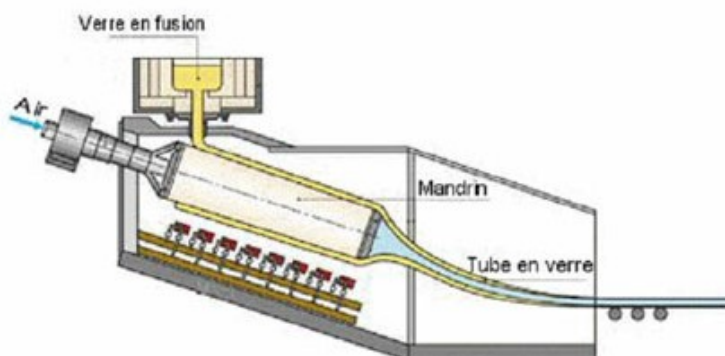


FIGURE 5.3 – Procédé Danner

9. Pièce mécanique de forme cylindrique

Procédé Vello

Ce procédé est utilisé pour obtenir des tubes de plus grands diamètres.

Le verre en fusion coule dans un tuyau qui a une tige en forme de cône au milieu pour obtenir le tube de verre au diamètre voulu.

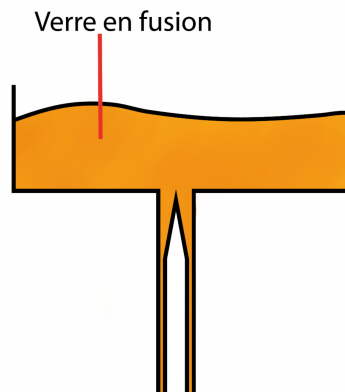


FIGURE 5.4 – Procédé Vello

5.2 Verre plat

Pour la fabrication de verre plat, beaucoup de procédés ont été développés. Certains sont toujours utilisés et d'autres ne le sont plus pour différentes raisons comme les coûts de fabrication trop élevés par rapport à un autre procédé.

5.2.1 Procédé Twin

Lors du procédé Twin, les matières premières sont fondues ensemble dans un grand bassin à plus ou moins 1550°C. Puis le verre fondu coule par lui-même entre deux rouleaux de laminage. On obtient ainsi un ruban de verre rayé et de largeur constante, mais qui a une épaisseur variable en fonction de la vitesse de rotation des laminaires. Le ruban de verre passe alors à travers l'étenderie¹⁰ qui refroidit le verre lentement et de manière contrôlée pour éviter toutes fissures ou autres contraintes à la future exploitation du verre. Par la suite, le verre passe dans une machine appelée Twin d'où le nom du procédé qui lamine les deux faces du verre simultanément. En sortant de cette machine, les deux faces du verre sont planes et parallèles entre elles ; le verre est encore translucide. On le polit et on le nettoie. Ainsi il est transparent, propre et prêt pour la découpe.

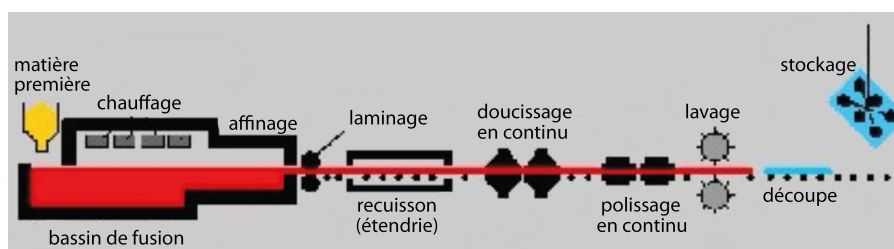


FIGURE 5.5 – Illustration du Procédé Twin

10. Four-tunnel pour le refroidissement du ruban de verre plat

Avec ce procédé, on obtient un verre de très bonne qualité optique. Cependant, il n'est plus utilisé, car les coûts de fabrication sont trop importants.

5.2.2 Procédé de laminage

Pour ce procédé, le verre en fusion se trouve dans un bassin dont un côté favorise le débordement. Le verre qui déborde est aplati entre deux rouleaux comportant des dessins qu'ils impriment sur le verre. Voilà comment s'obtiennent les verres imprimés.

Le même principe est utilisé pour le verre armé. Dans ce cas, une armature de fils métalliques est introduite dans le verre avant de passer entre les deux rouleaux.

5.2.3 Procédé Float

Lors du procédé Float, le verre est fondu dans un grand bassin, puis passe dans le bassin d'affinage à 1350°C et descend progressivement jusqu'à 1000°C. Pendant le refroidissement, le verre est débarrassé de ses bulles gazeuses et ainsi homogénéisé. Le verre coule alors dans un four avec un bassin d'étain. Ce bassin contient de l'étain de grande pureté en fusion et l'atmosphère du four est réductrice. Cela veut dire qu'il n'y a pas d'oxygène dans le four pour éviter l'oxydation de l'étain. Étant donné que l'étain est plus dense que le verre fondu, le verre flotte sur l'étain sans se mélanger, c'est comme l'huile qui flotte sur l'eau. Cela forme un ruban d'une épaisseur naturelle de 6 mm. À l'aide du dispositif annexe, on peut limiter ou accélérer l'étalement du verre et on contrôle ainsi l'épaisseur et le parallélisme. En même temps d'être étalé, le verre est poli des deux côtés, la face supérieure par le feu qui maintient la température et la face inférieure par le contact entre le métal et le verre. Le verre sort de ce four à une température de 620°C. Il passe alors entre deux rouleaux qui le font avancer dans l'étenderie¹¹. Celle-ci cuit à nouveau le verre et abaisse progressivement la température jusqu'à 250°C. Le verre refroidit alors à l'air libre et est ensuite découpé à la taille voulue.

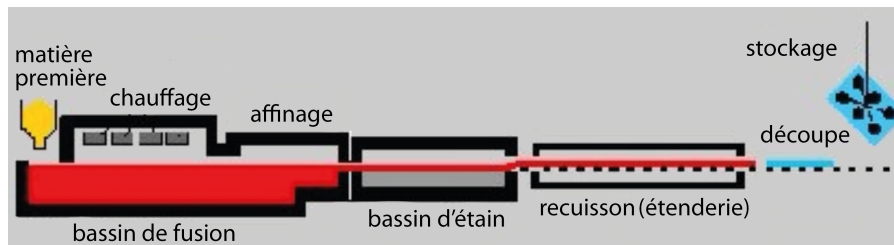


FIGURE 5.6 – Illustration du procédé Float

Ce procédé fût inventé par Pilkington dans les années 1960 et est aujourd'hui un des modes de fabrication les plus utilisés dans le monde.

5.2.4 Procédé par étirage vertical

Pour la fabrication de verre plat par étirage vertical, il existe deux procédés qui fonctionnent avec le même principe et seul un détail les différencie.

Procédé Fourcault

Lors du procédé Fourcault, le verre est fondu dans un grand bassin. Sur celui-ci, se trouve un flotteur en terre réfractaire qui surnage le bassin et son fond, aussi appelé débiteuse, est percé d'une fente qui permet au verre d'entrer dans le flotteur. Grâce au principe des vases communicants, le verre monte dans le flotteur. Une amorce métallique est alors fixée au verre pour pouvoir le tirer vers le haut à l'aide de rouleaux accouplés. Pour former un ruban de verre cohérent, la vitesse de traction doit être proportionnelle au débit du bassin. Le

11. Four-tunnel pour le refroidissement du ruban de verre plat

verre est alors tiré entre huit à dix mètres vers le haut, mais ce trajet est divisé par des compartiments dans lesquels la température varie. Plus le verre monte, plus la température est basse. Le verre est refroidi par le rayonnement de tube de circulation d'eau.

Le problème avec ce procédé est que le débiteur est source de stries dans le verre.

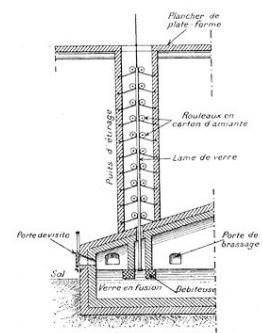


FIGURE 5.7 – Procédé Fourcault

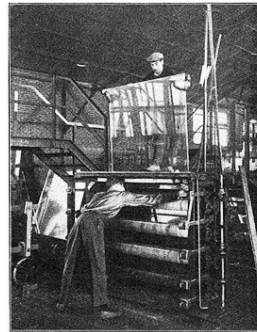


FIGURE 5.8 – La coupe de verre à la sortie du puits

Procédé Pittsburgh

Le procédé Pittsburgh est uniquement l'amélioration du procédé Fourcault pour éviter les stries de la débiteur. La différence entre les deux procédés est la débiteur. Dans le procédé Fourcault, la débiteur flotte et dans le procédé Pittsburgh, la débiteur est remplacée par une barre d'étrépage dans le verre fondu. Cela permet un départ rectiligne qui limite les défauts sur la surface du verre et un refroidissement plus adéquat. Les bords du verre refroidissent d'abord, ce qui entraîne une structure stable plus rapidement.

Procédé Libbey-Owens

Le procédé Libbey-Owens part du même principe que celui de Fourcault, mais il n'est pas entièrement vertical. Le verre fond dans le four à fusion puis est étiré 1,5 mètre vers le haut. Ensuite, le verre est courbé par des rouleaux et refroidit alors sur un tapis horizontal. Ce qui permet un refroidissement plus uniforme.

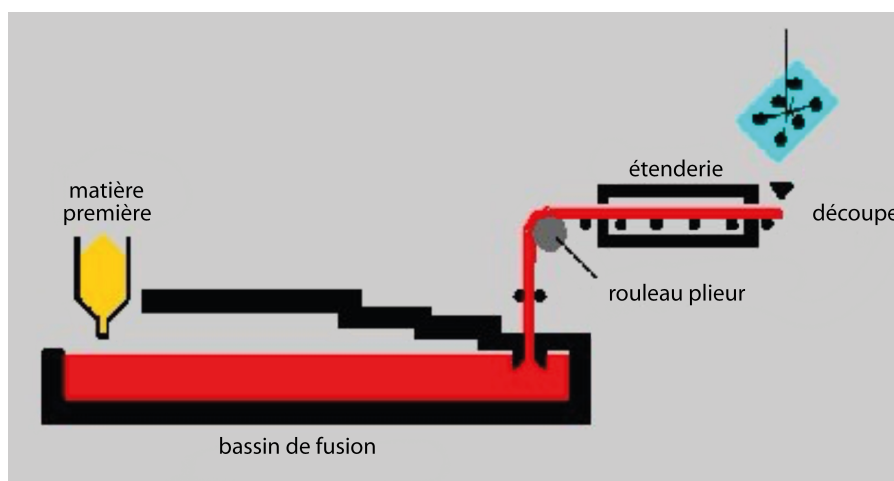


FIGURE 5.9 – Illustration du procédé Libbey-Owens

L'avantage de ce procédé est la possibilité de créer des feuilles de verre de n'importe quelle taille.

5.3 Fibre de verre

Le procédé de fabrication de fibre de verre est très simple.

Le verre est fondu dans un bassin à fusion puis il passe à travers des filières pour former des filaments de verre. Ensuite un fil de verre est formé par ces filaments. Ce fil est alors bobiné et séché.

Il existe différents types de fibres de verre : E, R, D, AR, C et la fibre de verre optique. Chacun de ces verres correspond à un usage spécifique.

Fibre de verre E

La fibre de verre E est utilisée dans le domaine du textile et de l'isolation thermique et électrique.

Exemples :

- Tapisserie très résistante
- Isolation de tuyaux de chauffage
- Étanchéité pour porte de four
- Protection de câbles et bobines d'induction

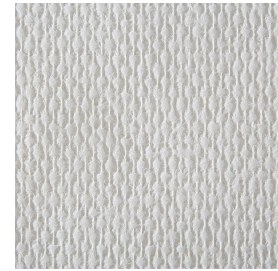


FIGURE 5.10 – Tapisserie en fibre de verre E

Fibre de verre R

La fibre de verre R a de hautes performances mécaniques et est donc utilisée dans le domaine de l'aviation, de l'aérospatiale et de l'armement.

Exemples :

- Renforcement des pales d'hélicoptère
- Plancher d'avions
- Réservoir de fusée
- Réservoir de missiles et de lanceurs



FIGURE 5.11 – Réservoir de fusée

Fibre de verre D

La fibre de verre D a des caractéristiques diélectriques ^a, elle peut donc être utilisée par exemple pour protéger contre l'humidité et renforcer, en électronique, une plaquette de circuits imprimés destinée à un circuit haute densité.

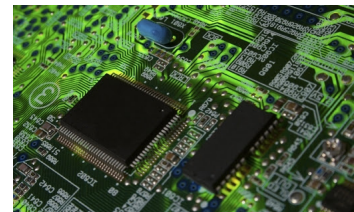


FIGURE 5.12 – Circuit imprimé

Fibre de verre AR

La fibre de verre AR (Alcali résistant) a été spécialement développée pour renforcer les mortiers à base de ciment standard. Lors de la prise du mortier, des composés alcalins sont générés, la fibre de verre Ar permet alors d'éviter les fissures et d'améliorer la résistance générale.

Fibre de verre C

La fibre de verre C a été créée pour des utilisations nécessitant une bonne résistance à la corrosion. Elle est utilisée comme protection extérieure des canalisations ou encore comme couche protectrice des tuyaux en composite.



FIGURE 5.13 – Protection extérieure des canalisations

^a. Permet aux forces électrostatiques de s'exercer

Fibre de verre optique

La fibre de verre optique est utilisée pour la transmission rapide de données informatiques grâce à la lumière, elle est donc utilisée pour les réseaux internes d'entreprises ainsi que pour les connexions terrestres des habitants.

La fibre de verre optique est aussi utilisée dans le domaine de la médecine, elle est utilisée comme lampe pour effectuer des diagnostics et est utilisée aussi lors du traitement comme laser.

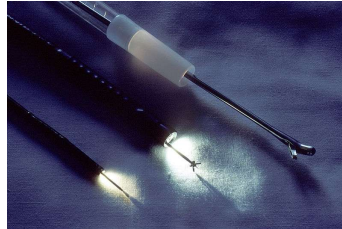


FIGURE 5.14 – Endoscope

Chapitre 6

Transformation

La plupart du temps, le verre creux n'a pas besoin d'être transformé avant de pouvoir être utilisé.

Cependant, après la production du verre plat, celui-ci n'est pas forcément prêt pour son utilisation. Une grande partie du verre plat doit être retravaillé ou transformé pour correspondre à sa future exploitation comme le miroir, le vitrage isolant, le vitrage actif ou encore les pare-brises.

6.1 Miroir

Un miroir est composé de verre, d'une couche d'argent ou d'aluminium et d'une couche de cuivre ou de plomb.

Il existe deux types de miroirs : le miroir classique et le miroir-espion. Le miroir-espion est une vitre qui d'un côté fonctionne comme une vitre et de l'autre comme un miroir. On peut ainsi regarder dans une pièce sans qu'une personne présente dans la pièce ne le sache.

Étant donné que leur usage est différent, leur conception l'est aussi.

Pour un miroir classique, on prend une feuille de verre, on la nettoie correctement pour la dégraisser et enlever toute impureté. Puis on applique une fine couche d'argent ou d'aluminium comme cette couche est très fine pour que ce soit opaque, il faut appliquer une deuxième couche de cuivre ou de plomb. Cependant, cela n'est pas la seule raison pour laquelle on doit appliquer une couche de cuivre ou de plomb. L'argent s'oxyde avec le temps, il faut donc appliquer une couche supplémentaire pour la protéger.

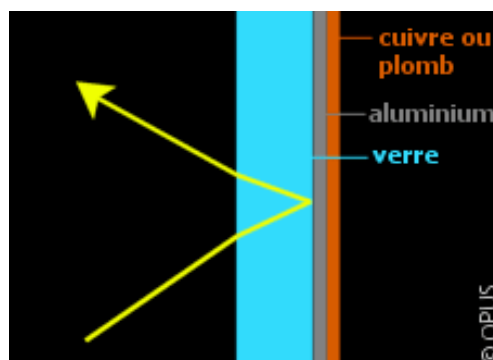


FIGURE 6.1 – La conception d'un miroir classique

Dans le cas d'un miroir-espion, on ne met pas de couche de cuivre ou de plomb. Cela permet de voir d'un côté à travers et pas de l'autre. Mais l'éclairage joue un rôle important pour qu'un miroir-espion passe inaperçu.

6.2 Vitrage isolant

Un simple vitrage sans traitement comme fenêtre n'est pas idéal. On perd de la chaleur en hiver et on a un effet de serre en été. De nos jours sont systématiquement installées des fenêtres à double vitrage ou même à triple vitrage.

Dans le cas du double vitrage, la fenêtre est composée de deux vitres séparées par un espaceur et l'espace est rempli par de l'air. Mais pour un meilleur rendement, l'espace est rempli la plupart du temps avec du gaz d'argon déshydraté. Il est aussi possible que ce soit du krypton. Cependant le krypton est un gaz rare et donc les fenêtres remplies de celui-ci sont moins courantes. Bien sûr, un joint assure l'étanchéité et la cohésion de la fenêtre.

En fonction des caractéristiques voulues, il peut y avoir une couche à basse émissivité pour laisser un petit peu de chaleur s'échapper vers l'extérieur. L'émissivité est l'aptitude d'un corps à émettre de l'énergie par rayonnement (infrarouge).

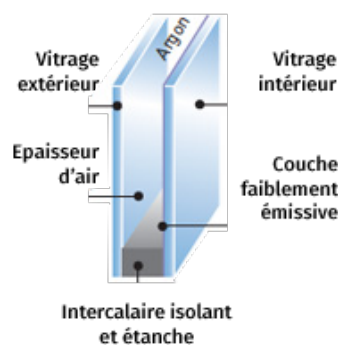


FIGURE 6.2 – Schéma de la composition d'un double vitrage isolant

6.3 Vitrage actif

Le vitrage actif est un vitrage qui change de propriété physique quand une petite tension électrique y est appliquée. Pour comprendre les changements de l'état de la vitre et la différence entre les types de verres actifs, il faut préciser certains vocabulaires. Une vitre peut avoir différentes propriétés en fonction de ce que l'on voit. Une vitre peut être transparente, translucide, opaque ou encore teinte. Mais quelle est précisément la différence entre ces différentes propriétés ? Voici un tableau pour visualiser la différence entre ces propriétés.

	Transparent	Translucide	Opaque	Teint
La lumière passe à travers	Oui	Oui	Non	Très peu
On voit à travers	Oui	Non	Non	Oui

Un vitrage classique est transparent. Il existe différents verres actifs, il y a le verre électrochrome qui se teint, le verre à occultation qui devient translucide ou encore le verre chauffant.

Le verre actif était considéré comme le verre du futur, mais aujourd'hui ce type de verre n'est plus du futur, car il existe et est même déjà installé dans différents bâtiments.

6.3.1 Verre électrochrome

Le verre électrochrome est un verre qui se teint lorsqu'il est soumis à une tension électrique. Il laisse donc moins passer la lumière, mais cela n'a pas d'impacte sur la visibilité. C'est donc un verre qui sert à la fois comme fenêtre et comme store. On peut même varier l'intensité de la teinture. Malgré la teinture, on voit toujours l'extérieur, la visibilité n'est pas réduite.



FIGURE 6.3 – Exemple de verre électrochrome avec variation de la teinture

Avoir des fenêtres avec du verre électrochrome permet de mieux gérer la température ambiante. Ces fenêtres permettent également d'être moins ébloui tout en gardant la vue sur l'extérieur. On peut ainsi profiter plus de la lumière naturelle. Avec ces bénéfices, on allume moins la climatisation et les lampes, ce qui permet d'avoir une meilleure performance énergétique au niveau du bâtiment.

Il existe pour le moment trois technologies différentes pour fabriquer le verre électrochrome : la technologie organique, la technologie inorganique et la technologie des polymères. Mais la technologie des polymères n'est pas encore entièrement développée.

Technologie organique

Le verre produit avec la technologie organique est composé de cinq couches, la première étant à l'intérieur :

- 1) une feuille de verre
- 2) une couche de «Transparent conductive oxyde» ¹
- 3) une couche de gel électroactif
- 4) une couche de «Transparent conductive oxyde»
- 5) une feuille de verre

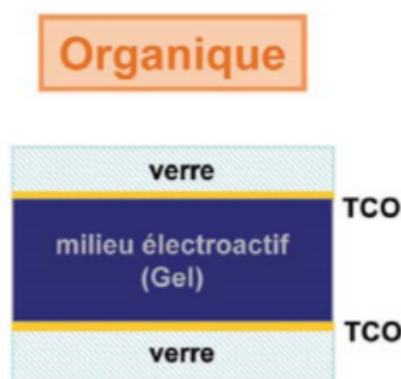


FIGURE 6.4 – Schéma explicatif du verre électrochrome organique

1. Un matériel conducteur électrique qui absorbe peu les ondes électromagnétiques du spectre visible

Cette technologie permet d'avoir un bon contraste visuel et une couleur neutre. En revanche, la taille des vitres est limitée à cause du gel qui doit rester étalé sur toute la surface, ce qui est plus compliqué avec de très grandes surfaces. De plus, le gel organique n'est pas durable ce qui a comme conséquence qu'il faudrait changer de fenêtres après un certain temps.

Technologie inorganique

Le verre électrochrome inorganique est composé de sept couches, la première étant à l'intérieur :

- 1) une feuille de verre
- 2) une première électrode
- 3) une contre électrode
- 4) un électrolyte
- 5) une couche électrochrome
- 6) une seconde électrode
- 7) une feuille de verre

Il se peut aussi que dans certains cas une feuille de plastique soit ajoutée entre les couches 6 et 7.

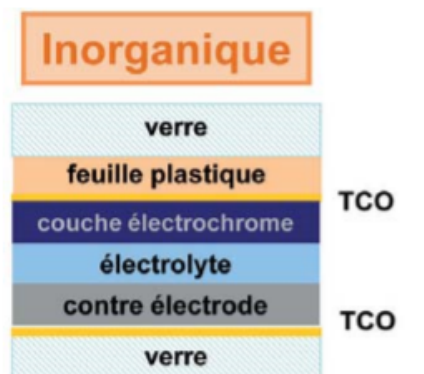


FIGURE 6.5 – Schéma explicatif de la composition du verre électrochrome inorganique

Les avantages de cette technologie sont sa durabilité, sa performance et sa production en grandes tailles. Cependant, le prix est élevé et la vitre n'est pas complètement incolore, elle est bleue, mais d'après des retours d'utilisateurs, on s'y habitue rapidement.

Fonctionnement

Le verre électrochrome est composé de plusieurs couches comme nous venons de le voir. Le fait d'appliquer une tension électrique provoque le transfert d'ions entre les différentes couches. Cela a comme conséquence une teinture du verre. Lorsque la polarité aux bornes de la vitre est inversée, le verre s'éclaircit à nouveau. La polarité est inversée avec un interrupteur.

6.3.2 Vitrage à occultation

Ce vitrage a la capacité d'être translucide quand il n'y a pas de tension électrique et transparent lorsqu'il y a une légère tension électrique. Ce vitrage est souvent utilisé pour des salles de réunions ou encore des salles de bains. L'avantage de ce vitrage est que dans l'état translucide, la lumière passe toujours à travers. Cela fait la différence avec le verre électrochrome où l'on voit encore à travers, mais la lumière ne passe plus correctement.

Le vitrage à occultation est composé de deux feuilles de verres qui sont séparées par une couche de cristal liquide qui est entourée de couches de PVB² enduites d'une couche transparente conductrice.

Lorsqu'il n'y a pas de courant électrique, les cristaux liquides ne sont pas alignés et le verre est alors translucide. En revanche, lorsque le courant électrique est allumé, les cristaux s'alignent sous son effet et le verre devient transparent. (voir figure 5.3)



FIGURE 6.6 – Exemple de vitrage à occultation

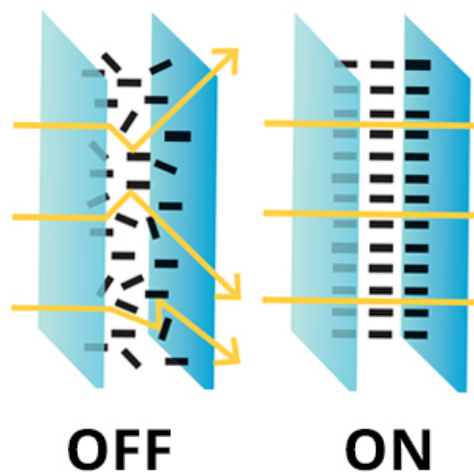


FIGURE 6.7 – Schéma explicatif du fonctionnement de la couche de cristal liquide

6.3.3 Vitrage chauffant

Un vitrage chauffant ne montre aucune différence avec le vitrage classique du point de vue visuel. Mais il a une compétence en plus, il peut faire office de chauffage. Dépendant de l'installation et de la constitution de la pièce, ce vitrage peut remplacer complètement le chauffage classique ou le compléter.

Un vitrage chauffant est composé simplement de deux feuilles de verre et celle faisant face à l'intérieur est recouverte d'une couche d'oxyde métallique microscopique.

Lorsque le vitrage chauffant est allumé, un courant entre 250 W/m² à 310 W/m² parcourt la couche conductrice. Cela permet de transformer l'énergie électrique en chaleur qui est émise par rayonnement.

6.4 Verre trempé

Le verre trempé est plus résistant que le verre classique. Pour obtenir un verre trempé, on réchauffe le verre à 600°C et puis on le refroidit d'un coup. Ainsi l'extérieur du verre est refroidi instantanément, mais l'intérieur

2. abréviation pour polybutyral de vinyle qui est du plastique

ne refroidit que lentement. Des contraintes de compression apparaissent alors au niveau de l'extérieur, alors qu'à l'intérieur cela entraîne des contraintes de traction. Ces forces permettent donc au verre d'être très difficilement cassable. Voilà pourquoi la trempe n'a lieu que lorsque le verre a la forme et la taille voulue, et non avant.

6.5 Pare-brise

Un pare-brise est plus résistant qu'une feuille de verre classique grâce à une feuille de polybutyral de vinyle aussi appelé PVB. Le PVB est du plastique.

Le verre du pare-brise est composé de sable, de dolomite et de soude. Le verre est produit avec le procédé Float.

Pour la découpe, un traceur numérique incise le contour du pare-brise et un chalumeau suit ce tracé. Le choc thermique provoqué par le chalumeau finit la coupe du verre. À l'aide de bande de ponçage, les arêtes coupantes sont éliminées. Cette opération est appelée lissage.

Le verre est ensuite lavé à l'eau savonneuse puis aspergé de talc et d'eau pour éviter de coller à la deuxième feuille de verre qui est posé dessus juste après. La bande d'obscurcissement est alors posée à l'aide de la sérigraphie et un contrôle visuel est effectué.

Les deux feuilles de verre sont alors cadrées et insérées dans un fer à cintrer. L'ensemble est alors chauffé, le verre s'assouplit et prend la forme voulue. Puis le tout est refroidi lentement pour fixer le verre dans sa forme définitive. Pendant que le verre est chauffé, une feuille de polybutyral de vinyle (PVB) est coupée à la forme exacte du pare-brise. La deuxième feuille est alors soulevée, la feuille de PVB placée sur la première feuille et la deuxième feuille est déposée dessus. Mais il faut encore la rendre transparente.

Lorsque le PVB est installé entre les deux feuilles de verre, il est blanc et laiteux parce qu'il a un grain de surface à répartition aléatoire. À cause de celle-ci, on ne voit pas à travers. Le fait d'écraser les grains de surface permet de les éliminer et donc d'obtenir une matière transparente.

Le pare-brise est donc compressé par des rouleaux de caoutchouc pour écraser les grains de surface et extraire l'air. Cette procédure provoque la formation de petites ventouses qui tiennent alors les différentes couches ensemble.

La patte de fixation du rétroviseur intérieur est alors posée. Le pare-brise passe dans un autoclave qui est une sorte de grosse cocotte-minute pour éliminer les dernières poches d'air. Le pare-brise subit alors une inspection finale avant d'être stocké et livré.

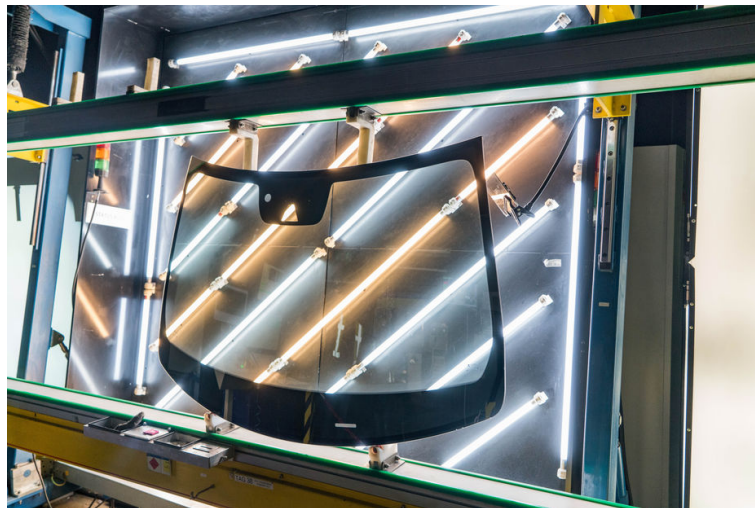


FIGURE 6.8 – Inspection du pare-brise

Chapitre 7

L'atelier de Christophe Genard

Lors des vacances de février 2020, j'ai eu l'occasion de voir un maître verrier au travail et de moi-même souffler du verre pour créer un objet. Cet atelier se nomme l'atelier de Christophe Genard qui collabore avec le musée Cristal Discovery. Ce musée concerne le site du Val Saint-Lambert en Belgique, l'histoire de la cristallerie et l'histoire du verre.

Lors de ma visite, j'ai eu la possibilité de créer avec l'aide du maître verrier deux objets de mon choix et selon mes goûts de couleur. L'atelier ne produit pas en grande masse. Son activité principale s'axe sur la démonstration pour les visiteurs du musée et la production de pièces en verre pour différents artistes.



FIGURE 7.1 – Mon petit bol orange



FIGURE 7.2 – Mon porte-stylo

Pour former un bol en verre avec une couleur, voici les étapes de fabrication que j'ai suivies :



FIGURE 7.3 – Étape 1 : Je mets à chauffer plusieurs cannes, deux au minimum.



FIGURE 7.4 – Étape 4 : Je roule le verre dans la couleur en faisant attention d'en mettre sur tout le verre.

Étape 2 : J'étale les grains de couleurs désirées sur une table en métal.

Étape 3 : Avec une canne, je cueille le verre dans le four à fusion toujours en tournant la canne.



FIGURE 7.5 – Étape 5 : Je réchauffe le verre dans le four de travail toujours en tournant la canne.



FIGURE 7.6 – Étape 6 : Je m'assois sur le banc et je commence à travailler le verre avec la mailloche qu'il faut tremper dans l'eau régulièrement.



FIGURE 7.7 – Étape 7 : Je souffle dans la canne pour percer le verre. Il faut garder une pression permanente lors du soufflage.



FIGURE 7.8 – Étape 8 : Je laisse un peu refroidir en continuant de rouler la canne.



FIGURE 7.9 – Le verre avant d'être soufflé



FIGURE 7.10 – Le verre après avoir été soufflé une fois



FIGURE 7.11 – Étape 9 : Le maître verrier cueille une deuxième fois sur le verre que j'ai déjà un peu travaillé.



FIGURE 7.12 – Étape 10 : Le maître verrier roule le verre sur une table en métal pour essayer de ne pas avoir trop de verre sur la canne, mais plus sur le bout.



FIGURE 7.13 – Étape 11 : Je le retravaille avec la mailloche.



FIGURE 7.14 – Étape 12 : J'utilise une pince pour créer une gorge qui va faciliter le détachement du verre de la canne.



FIGURE 7.15 – Étape 13 : On réchauffe le verre dans le four de travail.



FIGURE 7.16 – Étape 14 : Je souffle à nouveau de l'air à l'intérieur de la canne pour élargir la poche d'air à l'intérieur du verre.



FIGURE 7.17 – Le verre après le deuxième soufflage



FIGURE 7.18 – Étape 15 : J'utilise de nouveau la pince pour travailler encore un peu la gorge.



FIGURE 7.19 – Étape 16 : Je souffle de nouveau à l'intérieur.



FIGURE 7.20 – Étape 17 : Avec la mouillette, je travaille la forme du verre comme l’allonger.



FIGURE 7.21 – Étape 18 : Je pince de nouveau la gorge.



FIGURE 7.22 – Étape 19 : Je m’occupe alors de la base du bol. J’utilise une planche de bois pour aplatir la base.



FIGURE 7.23 – Étape 20 : Je pince de nouveau la gorge.



FIGURE 7.24 – Étape 21 : Je mets de l'eau sur la gorge pour faciliter le détachement.



FIGURE 7.25 – Étape 22 : Pendant ce temps, le maître verrier met un peu de craie sur la base.



FIGURE 7.26 – Étape 23 : Le maître verrier va cueillir un peu de verre pour former le ponti.



FIGURE 7.27 – Étape 24 : Le maître verrier forme le ponti.



FIGURE 7.28 – Étape 25 : Il colle ensuite le ponti sur la craie de la base dans l'axe de la première canne.



FIGURE 7.29 – Étape 26 : J'utilise ensuite une sorte de spatule pour frapper légèrement la première canne. Ainsi, je détache le verre de la première canne et notre objet à une ouverture.



FIGURE 7.30 – Étape 27 : On réchauffe le verre.



FIGURE 7.31 – Étape 28 : Je m'occupe maintenant de l'ouverture. J'utilise le haut de la pince pour réguler l'ouverture que j'ai créée. Je l'aplatis et étale le verre correctement autour de l'ouverture.



FIGURE 7.32 – Étape 29 : J'utilise toujours la pince pour agrandir l'ouverture. J'introduis la pince dans l'ouverture et je relâche la pression exercée sur la pince progressivement jusqu'à obtenir la taille d'ouverture souhaitée.

Étape 30 : Je laisse un peu refroidir.

Étape 31 : Je dépose alors l'objet toujours attaché à la canne sur un lit de coton.



FIGURE 7.33 – Étape 32 : Je détache la canne de la même manière que la première, je frappe légèrement sur la tige et le verre se détache à l'endroit où on avait mis de la craie.

Étape 33 : Je prends l'objet délicatement avec une pince protégée pour mettre l'objet dans le four de refroidissement.



FIGURE 7.34 – L'objet final avant d'être complètement refroidi

Chapitre 8

Crise du sable

Actuellement, nous subissons une crise de sable, dont peu de gens ont conscience. Cette crise affecte le monde entier de différentes manières.

Le sable est utilisé dans différents secteurs comme la production de verre, de puces électroniques, d'ordinateurs, de plastique, de peinture. Le sable est partout dans notre vie quotidienne sans que l'on s'en rende compte et pourtant la grosse majorité de nos bâtiments sont composés de sable. La construction est le secteur qui consomme le plus de sable à cause du béton.

Pour construire une maison de taille moyenne par exemple, il faut 200 tonnes de sable, pour un bâtiment plus grand comme un hôpital, 3 000 tonnes, pour un kilomètre d'autoroute, 30 000 t de sable et pour une centrale nucléaire, 12 000 000 tonnes. Chaque année, plus de 15 milliards de tonnes de sable sont utilisées dans le monde entier. Le sable est après l'air et l'eau, la ressource la plus utilisée, mais elle n'est pas durable.

Au début, on creusait dans les carrières pour obtenir du sable, mais nous avons épuisé toutes ces ressources. Nous nous sommes alors tournés vers l'extraction de sable dans les fleuves, mais cela causait plus de crues. Nous nous sommes donc tournés vers la mer en pensant que c'était la solution à tous nos problèmes. Nous pensions que cela n'affecterait ni le paysage ni l'environnement.

Pourquoi ne pas prendre le sable des déserts ? Simplement parce que le sable n'est pas le même partout. Le sable des déserts est rond et lisse et le sable marin a une surface rugueuse. Le sable du désert ne tient pas ensemble à l'inverse du sable marin. Nous sommes donc forcés d'aller chercher notre sable dans la mer.

Pour extraire le sable du fond marin, des dragueurs sont utilisés. Ce sont des bateaux qui ont deux grands bras qui pompent le sable sur le bateau. Lors de ce pompage, les animaux et les plantes se trouvant sur le fond marin sont également aspirés et sont donc éliminés. Ces animaux et plantes sont la base de la chaîne alimentaire du monde marin. Donc l'extraction de sable a un impact drastique sur le monde marin et pas seulement. Cela impacte également les pêcheurs et ainsi aussi l'économie.

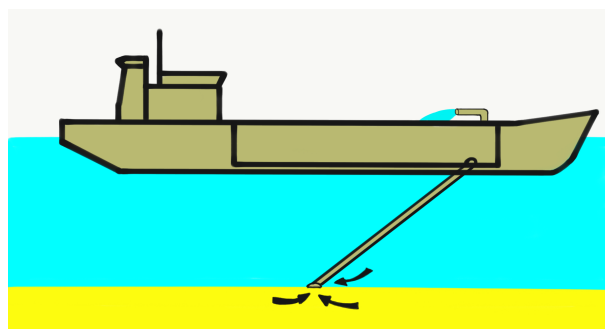


FIGURE 8.1 – Dragueur

Mais encore, l'extraction massive de sable cause aussi la disparition de plage et aussi d'îles entières.

Pourquoi me direz-vous les plages disparaissent-elles avec l'extraction le sable sur le fond marin et non sur celles-ci ?

Lorsque l'on extrait du sable du fond marin au large, on crée un trou, un espace vide qui est rempli par le mouvement de l'eau et par le sable des plages qui glisse vers le bas. Ce schéma se répétant sans cesse finalement, il n'y a plus de sable sur la plage.

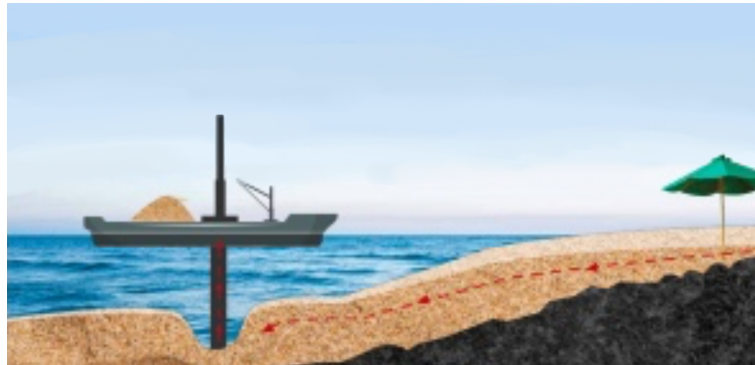


FIGURE 8.2 – Schéma explicatif pour la disparition des plages

Voici un exemple concret pour la disparition des plages. Dans la commune de Soulac-sur-Mer (France), le bâtiment de résidence nommé «Le Signal» a été construit en 1967 à 200 mètres de l'océan. En 2018 la mer ne se trouve plus qu'à 9 mètres du bâtiment.



FIGURE 8.3 – Disparition de la plage avec comme référence le bâtiment «Le Signal»

Une autre cause de la disparition des plages sont les constructions trop proches de la plage. La plage ne peut ainsi pas reculer comme elle le ferait en temps normal. En été, les plages deviennent plus épaisses alors qu'en hiver lors d'intempérie, elles s'aplatissent pour mieux absorber l'énergie des vagues. Mais pour survivre à ces intempéries, elles ont besoin d'espace derrière elles, ce qui est de moins en moins le cas à cause des constructions multiples.

Par ailleurs, le trafic de sable est très important dans le monde entier. La mafia vole le sable sur un grand nombre de plages dans le monde entier. Parfois celui-ci est vendu immédiatement sans être lavé. Il est donc hautement corrosif. Les bâtiments construits avec risquent alors l'effondrement rapidement.

La construction de barrage n'aide absolument pas non plus. Aujourd'hui, rares sont les fleuves qui n'ont pas de barrage. Pourtant le sable vient des fleuves, plus précisément de roches qui, à cause du gel, sont cassées en plus petits morceaux emportés par des ruisseaux et qui finissent dans des fleuves. Ce sable est alors censé arriver dans la mer grâce au fleuve. Cependant ce phénomène naturel ne peut se poursuivre à cause des barrages qui retiennent le sable. Même lorsque le sable arrive à passer le barrage, son extraction du fleuve l'empêche d'atteindre la mer pour ensuite aller alimenter nos plages.

Aujourd'hui, la situation est très alarmante, malheureusement nous n'en parlons pas assez. Les États, grands consommateurs de sable pour construire les routes, réalisent-ils l'ampleur de la crise ?

Chapitre 9

Conclusion

Est-ce que le verre a déjà atteint son plus haut potentiel ? Voici la question que je me suis posée au début de ce travail. Difficile de répondre de façon affirmative ou négative à cette question aussi complexe. En effet, personne ne sait quels progrès scientifiques nous attendent dans le futur et comment ceux-ci pourraient changer notre vie quotidienne de manière inimaginable.

C'est pourquoi je suis convaincue que le verre n'a pas encore atteint son plus haut potentiel. Nos fenêtres deviennent de plus en plus grandes et pourtant nous ne perdons pas forcément plus d'énergie, justement parce qu'elles sont également améliorées tous les jours pour mieux correspondre aux besoins d'une maison en fonction de son environnement. Les verres pour lunettes ont également de plus en plus d'options, ainsi que les écrans de nos appareils électroniques.

Je pense que le plus grand défi à venir sera de trouver du sable pour la fabrication de verre. Comme expliqué dans le chapitre précédent, les ressources diminuent du fait d'une construction (immobilière, routière) galopante. Et ce d'autant qu'aujourd'hui, le verre est considéré comme une alternative aux plastiques. Si l'industrie du verre n'est pas celle qui consomme le plus, la pénurie de sable aura néanmoins de fortes répercussions sur sa production.

Quant à la production du verre, hormis trouver une solution pour baisser la température des fours, peu de solutions s'offrent à nous à mon avis. Ces fours consomment beaucoup d'énergie. Produire du verre à des températures plus basses serait bénéfique pour la nature ainsi que pour les coûts de production. Nous pourrions nous inspirer de l'euplectella *Aspergillum* présenté dans le chapitre sur la production naturelle pour trouver des alternatives au niveau des procédés de production.

En conclusion, j'ai beaucoup appris à travers ce travail et ce matériau qui existe depuis des siècles et qui est toujours aussi fascinant. Reste à trouver des moyens pour le pérenniser et pourquoi pas nous inspirer de la nature pour cela ?

Chapitre 10

Bibliographie

+IMPAKT. (s. d.). Le verre.

Consulté à l'adresse http://positiveimpakt.eu/wp-content/uploads/2018/05/Boîte-à-outils-03_Les-verres.pdf

1985 : le verre flotté. (s. d.).

Consulté à l'adresse https://techno.freou.free.fr/animatech/_verre_carrefour/co/Mon_Module_34.html

A. (2009, septembre 21). La fibre de verre : présentation et applications.

Consulté à l'adresse <https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-la-fibre-de-verre---presentation-et-applications-3166.htm>

Bailly, S. (2014, février 13). Affaiblir le verre pour le rendre plus résistant.

Consulté à l'adresse <https://www.cerveauetpsycho.fr/sd/materiaux/affaiblir-le-verre-pour-le-rendre-plus-res-istant-11845.php>

Bauge, P. (2016, janvier 13). Du verre et de la lumière dans le fond des océans !

Consulté à l'adresse <https://kidiscience.cafe-sciences.org/articles/du-verre-et-de-la-lumiere-dans-le-fond-des-oceans/>

Belisol. (s. d.). Vitrage anti-UV : idéal pour des larges châssis.

Consulté à l'adresse <https://www.belisol.be/fr/article/vitrage-anti-uv--ideal-pour-des-larges-chassis--t>

Bernon, N. (2019, septembre 12). Le sable, une ressource essentielle en voie de disparition.

Consulté à l'adresse <https://theconversation.com/le-sable-une-ressource-essentielle-en-voie-de-disparition-122094>

Bonnet, C. (s. d.). Fiche détaillées : La silice industrielle.

Consulté à l'adresse https://www.lasim.org/images/doc_gratuite/la-silice-industrielle.pdf

Bouteille de bière. (s. d.). In Wikipédia.

Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouteille_de_bi%C3%A8re#Couleur

Cabezas, E. (2014, mai 9). La fibre optique principe et application en Médecine.

Consulté à l'adresse <https://prezi.com/5tl2ieruvoa9/la-fibre-optique-principe-et-application-en-medecine/>

Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. (s. d.).

Consulté à l'adresse <https://www.cnrtl.fr/dictionnaires/anciens/chomel/menu.php>

C'est pas sorcier. (2015a, septembre 7). Le verre dans tous ses états - C'est pas sorcier [Fichier vidéo].

Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=ww6QJNiOn4c>

C'est pas sorcier. (2015b, septembre 7). Sorciers se mettent au verre - C'est pas sorcier [Fichier vidéo].

Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=tSLbXHHS8ZY>

Courty, J. M., & Kierlik, É. (2010, novembre 27). Le verre : attention, fragile !

Consulté à l'adresse <https://www.cerveauetpsycho.fr/sd/physique/le-verre-attention-fragile-6229.php>

DarnaTelevision. (2016, janvier 14). Fabrication et transformation du verre [Fichier vidéo].

Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=hkameYV93Hg>

Différence béton, ciment, mortier - GuideBeton.com. (s. d.).
 Consulté à l'adresse <http://www.guidebeton.com/difference-beton-ciment-mortier>

École des mines de Paris. (s. d.). La ressource sable dans le monde : vers l'épuisement ? – L'extraction de sable marin. Consulté à l'adresse http://controverses.mines-paristech.fr/public/promo15/promo15_G5/www.controverses-minesparistech-1.fr/_groupe5/un-point-dentree-dans-une-problematique-mondiale/la-ressource-sable-dans-le-monde-vers-lepuisement/index.html

Fédération de l'industrie du verre. (s. d.-a). Les vitrages isolants .
 Consulté à l'adresse <https://www.vgi-fiv.be/le-verre/les-vitrages-isolants/>

Fédération de l'industrie du verre. (s. d.-b). Renseignements sur le matériau.
 Consulté à l'adresse https://www.vgi-fiv.be/wp-content/uploads/2012/09/Matériau-Verre_1999.pdf

Fédération de l'industrie du verre . (s. d.). Le verre.
 Consulté à l'adresse <https://www.vgi-fiv.be/le-verre/le-verre/>

Fenêtre chauffante : tout savoir sur son fonctionnement. (2018, novembre 22).
 Consulté à l'adresse <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/fenetre-chauffante-tout-savoir-sur-son-fonctionnement>

Final. (s. d.). Fibre de verre E.
 Consulté à l'adresse <https://www.final-materials.com/fr/26-fibre-de-verre-e>

Fulgurite. (s. d.).
 Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-fulgurite-12840/>

Garde corps en verre. (s. d.). Delamination du verre.
 Consulté à l'adresse <https://www.gardecorpsenverre.be/au-niveau-de-la-delamination.html>

Géraldine Rec. (2014, novembre 27). Qu'est ce que la sérigraphie ? [Fichier vidéo].
 Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=RgRR_IEPW0U

Glassolutions. (s. d.). Verre à occultation commandée PRIVA-LITE.
 Consulté à l'adresse <https://glassolutions.fr/fr/produits/verre-occultation-commandee>

glaströsch. (s. d.-a). Fabrication de verre.
 Consulté à l'adresse <https://www.glastroesch.com/fr/activites/fabrication-de-verre.html>

glaströsch. (s. d.-b). Production du verre trempé de sécurité.
 Consulté à l'adresse <https://www.glastroesch.ch/fr/services/glaswissen/production-et-termes-physiques/production-du-verre-trempe-de-securite.html>

Guidoum, A. (2009, avril 30). VERRES [Diapositives].
 Consulté à l'adresse <https://docplayer.fr/4455330-Verres-a-guidoum-gc-2009-1.html>

Halioglass. (2019, octobre 8). Verre électrochrome : fonctionnement et utilisation en bâtiment.
 Consulté à l'adresse <https://halioglass.eu/fr/blog-fr/verre-electrochrome/>

Haussonne, J. M., Barton, J. L., Carry, C. P., & Bowen, P. (2005). Formage de tubes. In PPUR presses polytechniques, (Éd.), Céramiques et verres : principes et techniques d'élaboration (1re éd., Vol. 16, p. 763-764). Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Hérard, P. (2020, février 11). Pénurie de sable : un enjeu planétaire environnemental et économique. TV5MONDE.
 Consulté à l'adresse <https://information.tv5monde.com>

Industrie du verre creux. (2018, mars 6).
 Consulté à l'adresse <https://travail-emploi.gouv.fr/archives/archives-courantes/metiers-et-activites/article/industrie-du-verre-creux>

Jean Dupoirier. (2019, février 3). Enquete sur la disparition du sable [Fichier vidéo].
 Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=MFEM8PznN7s>

La collecte, le tri et le recyclage du verre des déchets ménagers et assimilés. (s. d.).
 Consulté à l'adresse <https://www.cercle-recyclage.asso.fr/mediatheque/publications-de-l-association/dossiers/>

55-cercle-national/publi/dossiers/materiaux/verre2007/169-verre04-la-collecte-le-tri-et-le-recyclage-du-verre-des-dechets-menagers-et-assimiles.html

La production de verre. (2010, mai 30). [Diapositives].
Consulté à l'adresse <https://www.kiknet-vetropack.org/app/download/10023927798/04a+La+production+du+verre.pdf?t=1440400295>

L'atelier du Verre Mousseline. (s. d.). Verre étiré Fourcault 1925 – L'atelier du verre Mousseline.
Consulté à l'adresse https://verrierie-mousseline.org/portfolio_page/verre_etire_fourcault_penchot_1925/

Le dictionnaire professionnel du BTP. (s. d.).
Consulté à l'adresse <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/alpha-index.html?lettre=v>

Les vitrages basse émissivité ou « Low E ». (2012, juillet 27).
Consulté à l'adresse <https://www.ecohabitation.com/guides/2662/les-vitrages-basse-emissivite-ou-low-e/>

Livage, J., & Cordain, T. (1999, novembre 30). Le verre biologique inspire les chimistes.
Consulté à l'adresse <https://www.cerveauetpsycho.fr/sd/chimie/le-verre-biologique-inspire-les-chimistes-2026.php>

Maubert, F. (1989). La silice pour l'industrie : mémento roches et minéraux industriels.
Consulté à l'adresse <https://infoterre.brgm.fr/rapports/89-SGN-150-GEO.pdf>

maxicours. (s. d.). Les verres et céramiques - Maxicours.
Consulté à l'adresse <https://www.maxicours.com/se/cours/les-verres-et-ceramiques/>

Mayer, N. (2019, juillet 14). La fabrication du verre en 5 étapes.
Consulté à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/physique-fabrication-verre-5-etapes-6225/>

Mendgen, E. (s. d.). Liège : Production du verre et du cristal dans le bassin de Liège.
Consulté à l'adresse <https://www.gr-atlas.uni.lu/index.php/fr/articles/wi55/gl103/wa122/li364>

More, M. (s. d.). Production du Verre Creux.
Consulté à l'adresse <http://www.glassway.vda.it/vetro/index.cfm?glass=2,120,0,0>

museecluny. (2017, octobre 27). Comment fabrique-t-on du verre au Moyen Âge ? [Fichier vidéo].
Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=CvfGSjwTTVs>

MyChauffage. (s. d.). Tout savoir sur le calorifugeage.
Consulté à l'adresse <https://www.mychauffage.com/blog/calorifugeage>

OPUS : Physique 534 : Compléments : Techniques de fabrication des miroirs. (2004, mai 4).
Consulté à l'adresse <http://lamh.gmc.ulaval.ca/opus/physique534/complements/techFab.shtml>

Pajean, G. (2007). Fabrication du verre creux. Verre, 13(6), 8-13.
Consulté à l'adresse <http://www.institutduverre.fr/revue-verre.php>

Philippe, M. (2007, décembre 13). Ampleur et diversité de la production du verre plat dans le royaume de France (XIV^e-XVI^e siècles), p. 1.
Consulté à l'adresse http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p308_01_philippe.html

Ruchmann, J. (s. d.). Les vitrages : laissez entrer la lumière !
Consulté à l'adresse https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie_habitat_193.pdf

Safi, B. (2010, mars 1). Le Verre - Procédés et Mise en Forme des Matériaux [Diapositives].
Consulté à l'adresse <https://www.yumpu.com/fr/document/read/17270984/le-verre-procedes-et-mise-en-forme-des-materiaux>

SageGlass. (s. d.). Comment ça marche ?
Consulté à l'adresse <https://www.sageglass.com/fr/comment-ca-marche>

SageGlass. (2018, février 14). Qu'est-ce que le verre électrochrome ?
Consulté à l'adresse <https://www.sageglass.com/fr/article/quest-ce-que-le-verre-electrochrome>

Saint-Gobain. (s. d.). Verre actif à occultation commandée.
Consulté à l'adresse <https://fr.saint-gobain-building-glass.com/fr/ssgg-privalite>

SaverGlass. (s. d.). La fabrication du verre .
 Consulté à l'adresse <https://www.saverglass.com/fr/expertises/verrier-haut-de-gamme/la-fabrication-du-verre>

Schneider, F. (2018, juin 12). Soulac-sur-mer, l'État s'engage à désamianter l'immeuble Le Signal.
 Consulté à l'adresse <https://www.la-croix.com/France/Justice/Soulac-sur-mer-lEtat-sengage-desamianter-limmeuble-Le-Signal-2018-06-12-1200946566>

SECM : conception et étude de structures et enveloppes du bâtiment métalliques ou en verre. (s. d.). Qu'est-ce qu'un vitrage électrochrome ?
 Consulté à l'adresse <https://secm.fr/encyclopedie-du-verre-par-secm/le-verre-electrochrome/>

Sooyeun, K. (2009, février 1). Contrast, Switching Speed, and Durability of V2O5 - TiO2 Film-Based Electrochromic Windows.
 Consulté à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/234977357_Contrast_Switching_Speed_and_Durability_of_V2O5_-_TiO2_Film-Based_Electrochromic_Windows

Sprimoglass. (s. d.). Glass.
 Consulté à l'adresse <https://www.sprimoglass.be/fr/glass>

Stadler, A. (2012, avril 1). Transparent Conducting Oxides—An Up-To-Date Overview.
 Consulté à l'adresse <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5448960/>

Systems, E. (s. d.). Lexique / Le recyclage du verre / Page d'accueil - Verre Avenir.
 Consulté à l'adresse [http://www.verre-avenir.fr/content/view/full/84/\(offset\)/40](http://www.verre-avenir.fr/content/view/full/84/(offset)/40)

Tamura, S. (1998, avril 14). Fibre de verre a faible constante diélectrique et tissu tisse de fibres de verre realise a partir de ces fibres - Google Patents.
 Consulté à l'adresse <https://patents.google.com/patent/WO1999052833A1/fr>

Techniglass. (2013, octobre 28). Fabrication Pare Brise OEM Pare-Brise.ca Montréal [Fichier vidéo].
 Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=lz-nuRbB1QA>

Tectite, Moldavite. (s. d.).
 Consulté à l'adresse <http://www.carionmineraux.com/tectite.htm>

Transvalor. (s. d.). Formage de verre.
 Consulté à l'adresse <https://www.transvalor.com/fr/cmspages/formage-de-verre.63.html>

Tual, M. (2015, mars 21). En Aquitaine, la gageure de la lutte contre l'érosion du littoral. Le Monde.fr.
 Consulté à l'adresse <https://www.lemonde.fr>

Valorlux. (s. d.). Verre.
 Consulté à l'adresse https://www.valorlux.lu/media/5c9e409adf2ff_fabrication-recyclage_verre_fr.pdf

Van Ruysdael. (s. d.). fabrication du verre - verre soufflé.
 Consulté à l'adresse <https://www.van-ruysdael.fr/verre/bibliotheque/fabrication-du-verre/verre-souffle/item278>

Verallia. (2017, juin 30). Introduction au verre d'emballage [Diapositives].
 Consulté à l'adresse <https://concurso.verallia.com.br/wp-content/uploads/2015/10/Verallia-Design-Awards-2017-Introduction-au-verre-demballage.pdf>

Verre Libyque. (s. d.).
 Consulté à l'adresse http://www.carionmineraux.com/verre_libyque.htm

Verre online. (s. d.).
 Consulté à l'adresse <http://www.verreonline.fr/index.php>

Verres. (s. d.).
 Consulté à l'adresse <https://www.lelementarium.fr/product/verres/>

vetropack Group. (s. d.). Glossaire.
 Consulté à l'adresse <https://www.vetropack.com/fr/le-verre/glossaire/>

Vikidia. (s. d.). Verre.
 Consulté à l'adresse <https://fr.vikidia.org/wiki/Verre>

Vitrumglass. (s. d.-a). Vitrage chauffant, nouveau verre innovant .
Consulté à l'adresse <https://www.vitrumglass.com/vitrage-chauffant>

Vitrumglass. (s. d.-b). Vitrage dynamique solaire, verre actif .
Consulté à l'adresse <https://www.vitrumglass.com/vitrage-dynamique>

Vitrumglass. (s. d.-c). Vitrage Opacifiant, verre actif et connecté .
Consulté à l'adresse <https://www.vitrumglass.com/vitrage-opacifiant>

VSF - Vitro Service France. (2017, octobre 3). VSF - la fabrication des vitrages automobiles [Fichier vidéo].
Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=CFzEGGSqFCI>

wikiHow. (2018, janvier 7). Comment souffler le verre.
Consulté à l'adresse <https://fr.wikihow.com/souffler-le-verre>

Wikipedia contributors. (2018a, juillet 12). Verre libyque.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_libyque

Wikipedia contributors. (2018b, décembre 7). Soufflage en couronne.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Soufflage_en_couronne

Wikipedia contributors. (2019a, janvier 6). Soufflage en manchon.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Soufflage_en_manchon

Wikipedia contributors. (2019b, janvier 27). Coulage.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Coulage#Verre_creux

Wikipedia contributors. (2019c, mai 17). Émile Fourcault.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89mile_Fourcault#Le_proc%C3%A9d%C3%A9_Fourcault

Wikipedia contributors. (2019d, juillet 20). Verre borosilicate.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_borosilicate

Wikipedia contributors. (2019e, juillet 20). Verre sodocalcique.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_sodocalcique

Wikipedia contributors. (2019f, juillet 23). Poly(butylal vinylique).
Consulté à l'adresse [https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly\(butylal_vinylique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly(butylal_vinylique))

Wikipedia contributors. (2019g, août 17). Électrochromisme.
Consulté à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrochromisme>

Wikipedia contributors. (2020a, février 6). Fibre de verre.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_de_verre

Wikipedia contributors. (2020b, février 10). Carbonate de sodium.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Carbonate_de_sodium

Wikipedia contributors. (2020c, mars 8). Pressage (matériaux).
Consulté à l'adresse [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pressage_\(mat%C3%A9riaux\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pressage_(mat%C3%A9riaux))

Wikipedia contributors. (2020d, mars 8). Verre creux.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_creux

Wikipedia contributors. (2020e, mars 11). Verre volcanique.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_volcanique

Wikipedia contributors. (2020f, mars 13). Extraction de sable.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraction_de_sable

Wikipedia contributors. (2020g, avril 2). Cénozoïque.
Consulté à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9nozo%C3%AFque>

Wikipedia contributors. (2020h, avril 16). Sable.
Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable#Probl%C3%A8mes_%C3%A9cologiques

Wikipedia contributors. (2020i, avril 24). Silice.
Consulté à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/Silice>

Wikipedia contributors. (2020j, avril 26). Miroir.

Consulté à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/Miroir>

Wikiwand. (s. d.). Venus' flower basket.

Consulté à l'adresse https://www.wikiwand.com/en/Venus%27_flower_basket

Sources des illustrations

- Figure 3.1 - https://www.crystalage.com/online_store/moldavite-healing-crystal-31mm5.cfm
- Figure 3.2 - <http://whataearth.com/product/fulgurite>
- Figure 3.3 - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fulgurite>
- Figure 3.4 - <https://www.geodiversite.net/media1578>
- Figure 3.5 - https://en.wikipedia.org/wiki/Venus%27_flower_basket

- Figure 4.1 - 4.7 - Chloé Royen
- Figure 4.8 - <https://fr.wikihow.com/souffler-le-verre>
- Figure 4.9 - <https://fr.wikihow.com/souffler-le-verre>
- Figure 4.10 - <https://fr.wikihow.com/souffler-le-verre>
- Figure 4.11 - <https://fr.wikihow.com/souffler-le-verre>
- Figure 4.12 - <https://www.sprimoglass.be/fr/glass>
- Figure 4.13 - <https://www.sprimoglass.be/fr/glass>
- Figure 4.14 - <https://www.van-ruysdael.fr/verre/bibliotheque/fabrication-du-verre/coule-discontinu/item279>

- Figure 5.1 - <https://docplayer.fr/7160766-Fabrication-du-verre-creux.html>
- Figure 5.2 - <https://docplayer.fr/7160766-Fabrication-du-verre-creux.html>
- Figure 5.3 - <https://www.cercle-recyclage.asso.fr/mediatheque/publications-de-l-association/dossiers/55-cercle-national/publi/dossiers/materiaux/verre2007/169-verre04-la-collecte-le-tri-et-le-recyclage-du-verre-des-dechets-menagers-et-assimiles.html>
- Figure 5.4 - Chloé Royen
- Figure 5.5 - http://www.verreonline.fr/v_plat/fabr_glac1.php
- Figure 5.6 - http://www.verreonline.fr/v_plat/fabr_glac2.php
- Figure 5.7 - https://verrierie-mousseline.org/portfolio_page/verre_etire_fourcault_penchot_1925/
- Figure 5.8 - https://verrierie-mousseline.org/portfolio_page/verre_etire_fourcault_penchot_1925/
- Figure 5.9 - http://www.verreonline.fr/v_plat/fabr_vitr2.php
- Figure 5.10 - <https://www.bricoman.fr/tassoglas-toile-de-verre-prepeinte-160g-m-50ml.html>
- Figure 5.11 - [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centaure_\(%C3%A9tage_de_fus%C3%A9e\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centaure_(%C3%A9tage_de_fus%C3%A9e))
- Figure 5.12 - <http://www.electroniques.biz/~elecint/index.php/economie/vie-de-la-profession/item/64382-l-ipc-alerte-sur-les-problemes-de-fiabilite-dus-a-des-defauts-affectant-les-microvias-des-circuits-imprimes>
- Figure 5.13 - <http://www.farertuyau.com/high-temperature-water-insulation-pipe/seamless-pipe-glass-fiber-protection-pu.html>
- Figure 5.14 - <https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/medecine-endoscope-microscopique-aussi-fin-quun-cheveu-humain-45284/>

- Figure 6.1 - <http://lamh.gmc.ulaval.ca/opus/physique534/complements/techFab.shtml>
- Figure 6.2 - <https://www.k-line.fr/type-vitrage.aspx>
- Figure 6.3 - <https://www.verre-solutions.fr/content/verre-electrochrome>
- Figure 6.4 - https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie_habitat_193.pdf
- Figure 6.5 - https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie_habitat_193.pdf
- Figure 6.6 - <https://glassolutions.fr/fr/produits/verre-occultation-commandee>
- Figure 6.7 - <https://www.luminis-films.com/Film-depoli-a-cristaux-liquides>
- Figure 6.8 - <https://www.usinenouvelle.com/article/en-images-dans-l-usine-polonaise-de-saint-gobain-qui-produit-le-pare-brise-des-clio-et-208.N895774>

Figure 7.1 - 7.34 - Chloé Royen

- Figure 8.1 - https://www.haropaports.com/sites/default/files/media/downloads/yville_-_session_9h15_-_gestion_des_sediments_de_dragage.pdf
- Figure 8.2 - <https://www.davidson-distribution.com/Blog/vers-des-etes-sans-plages/>
- Figure 8.3 - <https://www.la-croix.com/France/Justice/Soulac-sur-mer-lEtat-sengage-desamianter-limmeuble-Le-Signal-2018-06-12-1200946566>

Chapitre 11

Remerciement

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Monsieur Pol Scholtes. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté et conseillé.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

L'équipe de l'atelier de Chirstophe Genard qui m'a permis de découvrir la fabrication du verre.

Madame Stéphanie Adolphe, pour avoir relu et corrigé mon mémoire. Ses conseils de rédaction ont été très précieux.

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Table des figures

3.1	Moldavite	8
3.2	Plusieurs fulgurites	9
3.3	L'intérieur d'une fulgurite	9
3.4	Obsidienne	9
3.5	L'éponge	10
4.1	L'atelier 1	11
4.2	L'atelier 2	12
4.3	Le four à fusion	12
4.4	Le four de travail	12
4.5	Les grains du verre	12
4.6	Le four à canne et à refroidissement	13
4.7	Le banc	13
4.8	Soufflage	14
4.9	Travail de la gorge	14
4.10	Attachement de la deuxième canne	14
4.11	Détachement du verre	14
4.12	Soufflage en couronne	15
4.13	Soufflage en manchon	15
4.14	Coulage de verre plat	16
5.1	Procédé soufflé-soufflé	18
5.2	Procédé Pressé-Soufflé	19
5.3	Procédé Danner	20
5.4	Procédé Vello	21
5.5	Procédé Twin	21
5.6	Procédé Float	22
5.7	Procédé Fourcalt	23
5.8	Procédé Fourcalt	23
5.9	Procédé Libbey-Owens	23
5.10	Tapisserie très résistante	24
5.11	Réservoir de fusée	24
5.12	Circuit imprimé	24

5.13	Protection extérieure des canalisations	24
5.14	Endoscope	25
6.1	Miroir classique	26
6.2	Vitrage isolant	27
6.3	Verre électrochrome	28
6.4	Verre électrochrome organique	28
6.5	Verre électrochrome inorganique	29
6.6	Vitrage à occultation	30
6.7	Cristal liquide	30
6.8	Inspection du pare-brise	32
7.1	Mon petit bol orange	33
7.2	Mon porte-stylo	33
7.3	Les cannes chauffent	34
7.4	Le verre dans la couleur	34
7.5	Le verre est réchauffé	34
7.6	Travailler le verre à la mailloche	34
7.7	1er soufflage du verre	35
7.8	Refroidissement en tournant la canne	35
7.9	Le verre avant le soufflage	35
7.10	Le verre après le premier soufflage	35
7.11	deuxième cueillage	35
7.12	Roulement sur la table	35
7.13	Deuxième travail de mailloche	36
7.14	Création de la gorge	36
7.15	Réchauffement du verre	36
7.16	Deuxième soufflage	36
7.17	Après le deuxième soufflage	37
7.18	Affinement de la gorge	37
7.19	Troisième soufflage	37
7.20	Travail avec la mouillette	38
7.21	Affinement de la gorge	38
7.22	Travail de la base	38
7.23	Affinement de la gorge	38
7.24	De l'eau sur la gorge	39
7.25	Pose de la craie	39
7.26	Cueillage de verre	39
7.27	Formation du ponti	39
7.28	Fixation de la deuxième craie	40
7.29	Détachement de la première canne	40

7.30	Réchauffement du verre	40
7.31	Régulation de l'ouverture	40
7.32	Agrandissement de l'ouverture	41
7.33	Détachement de la deuxième canne	41
7.34	L'objet final avant d'être refroidi	41
8.1	Dragueur	42
8.2	Disparition des plages	43
8.3	Le Signal	43