

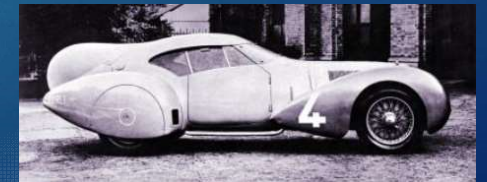


De l'obsidienne au pare-brise à affichage tête haute: Une histoire technico-industrielle du verre automobile

Ph. LEROY – Ingénieur CNAM – Responsable Qualité Client chez AGC

Remerciements à :
JG QUEROMES – B CASIN – O MASI

24 Février 2020



HISTOIRE, production, transformation => utilisation, propriétés optiques et mécaniques

CONFERENCE SUR LA DECOUVERTE DU VITRAGE AUTOMOBILE :

- AFIN DE MIEUX COMPRENDRE COMMENT ON PASSE DU SABLE AU VERRE,
- COMMENT ON L'UTILISE CHEZ LES CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES

Hôtel des arts et métiers
9 bis, avenue d'Iéna
PARIS

Le 24 février 2020 à 18h30

Sommaire

- ▶ -Histoire du verre
- ▶ -Matière première, mélanges
- ▶ -Float (procédé inventé par Pilkington) => fabrique du verre plat
- ▶ -Dépôts sous vide (pare-brise athermique)
- ▶ -Transformation => verre feuilleté
- ▶ -Transformation => verre trempé
- ▶ -Valeur ajoutée sur le verre => produit fini
- ▶ -Propriétés thermiques, optiques et mécaniques

Histoire du verre

- **Préhistoire:** on peut trouver les premières traces il y a 100.000 ans avec l'obsidienne, un verre volcanique riche en silice. Dur et capable d'être taillé comme le silex.



Pointes de flèches, lames tranchantes... plus rarement des bijoux étaient fabriqués à partir de gisements naturels d'obsidienne et donc les premiers négoce apparaissent.



Histoire du verre

- **Antiquité:** les premiers verres fabriqués viennent de Mésopotamie et sont destinés à la fabrication de bijoux et de vaisselle



Les premiers verres soufflés sont produits par les Phéniciens ou les Babyloniens quelques siècles avant J.-C. grâce à l'invention de la canne à souffler. Celle-ci permet de fabriquer des objets creux avec une teinte naturelle bleue verdâtre à cause des oxydes métalliques présents.



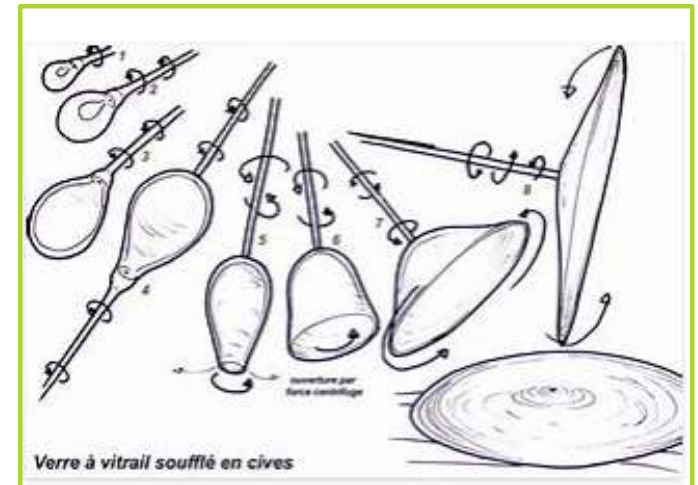
Histoire du verre

- **Antiquité:** Apparition du verre à vitre avec les premiers verres plats qui sont fabriqués par les Romains au I siècle avant notre ère. La matière vitreuse est coulée sur un lit de sable ou plaque de marbre puis étirée avec des pinces => qualité médiocre et translucide pour laisser passer la lumière dans les pièces des villas pompéiennes. C'est aussi là que l'on invente le premier double vitrage.
- **Moyen Âge:** Dans l'empire Romain tardif on fabrique les ampoules à eulogie comme éléments religieux (caractère inaltérable?)

Apparition du verre plat soufflé entre le V et le X ème siècle

Le soufflage en couronne (technique normande de la cive)

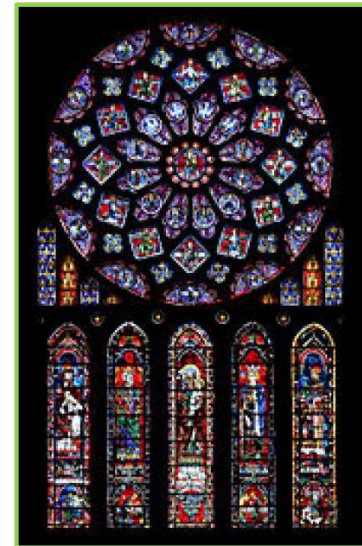
La force centrifuge permet à la paraison de se transformer en plateau circulaire



Histoire du verre

- **Déclin:** Le verre a un usage religieux spirituel mais aussi un usage « docte » car utilisé en médecine et en pharmacie.

Mais avec l'arrêt des échanges entre l'orient et l'occident le développement du verre va stagner et son utilisation va surtout se développer pour la fabrication des vitraux



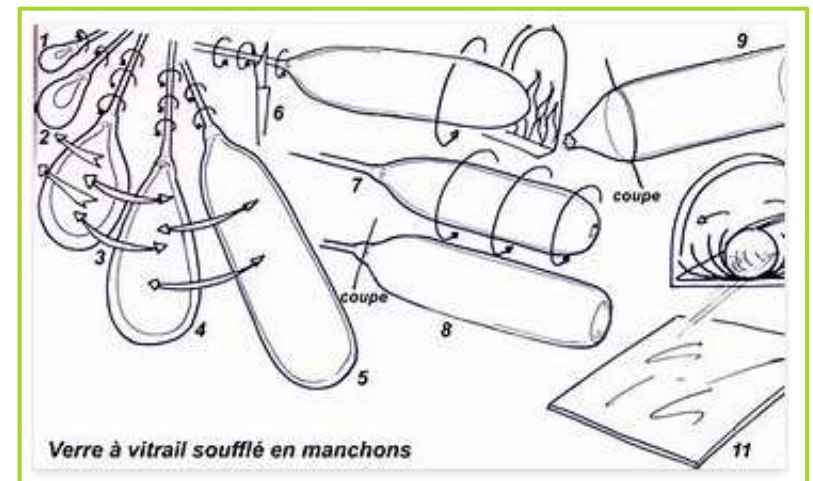
Histoire du verre

- ▶ **Verre à vitre (ou verre plat):** Bien que le verre plat était fabriqué en premier par les Romains il y eut une longue stagnation car la production restait artisanale et la technique limitée par la surface que l'on était capable de produire. C'est en 1330 en France à Bézu la Forêt que la première verrerie à vitre avec la fabrication de verre plat est inventée par Philippe Cacqueray noble « gentilhomme verrier ».
- ▶ **Renaissance:** A partir du XV siècle les verreries Vénitiennes (Murano) avec l'utilisation de mélanges (carbonate de soude) qui permettent d'améliorer la transparence (verre clair) ainsi que les couleurs avec certains oxydes.

Histoire du verre

Le soufflage en manchon: produit dans l'Est de la France et en Europe centrale (technique lorraine ou bohémienne)

Ce procédé est utilisé jusqu'au début du XX^{ème} siècle et encore aujourd'hui pour des productions artisanales.

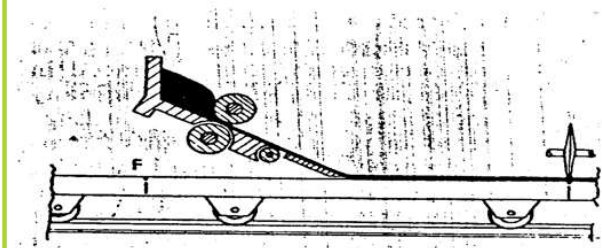


Histoire du verre

► Période moderne et contemporaine:

- l'industrialisation de la production du verre se concentre sur les mélanges **silice soude et chaux (verre sodocalcique)** ce qui donne au verre une teinte globalement verte.
Parmi les Arts & Métiers du Bâtiment en France apparaissent les premières normes avec les teintes de verre
- On fixe ainsi plusieurs qualité de verre: Le blanc – le demi-blanc et le verre vert...
- On définit aussi les origines des lieux de fabrication (qualité du sable)
- On améliore les propriétés chimiques affinage et mélanges des matières premières
- On améliore les propriétés mécaniques avec la trempe, la recuisson
- On améliore les capacités à travailler le verre (perçage, façonnage etc...
- On améliore les capacités à la mise en forme du verre à chaud
- On améliore les propriétés optiques

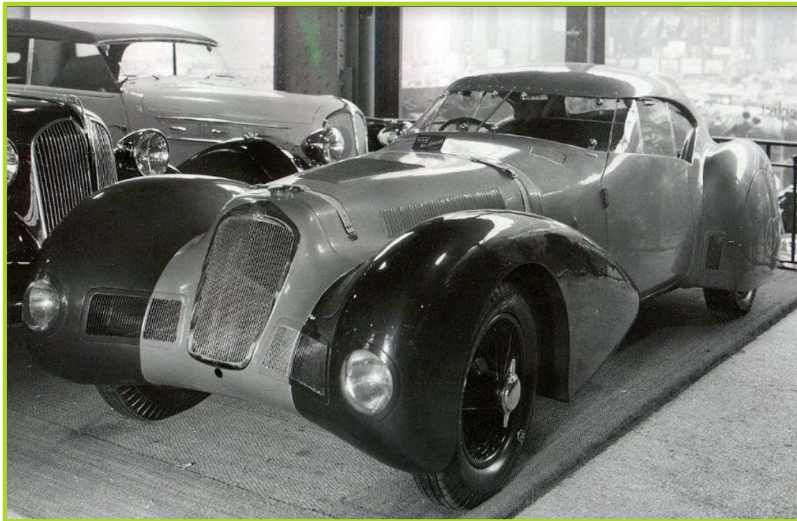
procédé BICHEROUX



Histoire du verre

► Période moderne et contemporaine:

- Mise en forme des vitrages => voir ce prototype Alfa Aérodinamica
- Concept « Vutotal » Delage V12 de 1936 par Labourdette



Histoire du verre

► Période moderne et contemporaine:

- Invention du **verre feuilleté** en 1903 par Edouard Benedictus et le **verre trempé** en 1929 avec le procédé « Sécurit » chez Saint-Gobain.
- Les progrès réalisés passent par des fours en coulée continue avec polissage des deux faces permettant de fabriquer le « verre blanc » en continu avec doucissage automatique.
- De toute évidence, tous ces procédés seront **remplacés à partir de 1956 par le « verre flotté »** que l'on doit à l'inventeur **Alastair Pilkington en 1952**.

Le « verre flotté » est une coulée de verre en fusion sur un bain d'étain à 1100°C



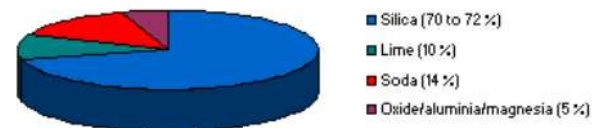
Matière première, mélanges

► La composition des matières premières est stratégique:

- 60% environ de sable ... mais pas n'importe lequel...
- 15% environ de carbonate de sodium
- 10% de chaux – Dolomie – calcaire
- 10% de calcin – groisil
- 5% d'oxydes Aluminium, Magnésium



Matières premières :



Matière première, mélanges



Grains de sable
ø 0,5mm à 60% - SiO_2

+



Soude - Na_2CO_3

+



Chaux vive - CaO

+

Calcin ou
groisil (Verre
recyclé
utilisé pour
baisser la
température
de fusion
du mélange)

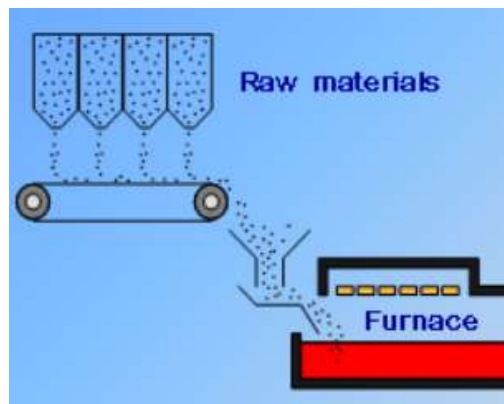
Al_2O_3 - MgCO_3

=



Feuilles de verre float

Matière première, mélanges



Le mélange est amené à l'entrée du four

Les substances sont introduites dans un mélange de sable, de soude et de chaux quartz. 5% d'oxydes tels que le magnésium et l'oxyde d'aluminium sont ajoutés à ce mélange. Ces additifs améliorent les propriétés physiques et chimiques du verre.

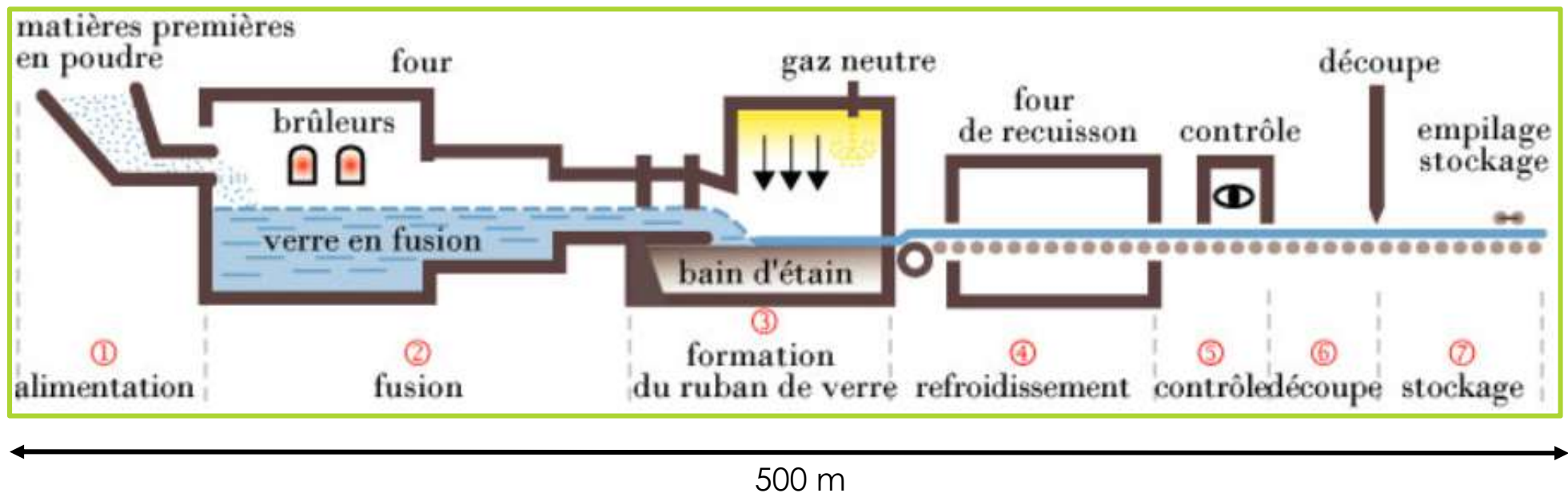
Float (procédé inventé par Pilkington)



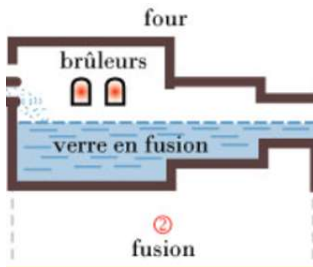
L'usine de Boussois, 2 lignes de Float environ 1.200 tonnes de verre produites chaque jour 7/7. Cette usine a 120 ans c'est la plus grosse de France elle mesure 500 m de long environ. Il y a environ 450 lignes de float dans le monde actuellement.

Float (procédé inventé par Pilkington)

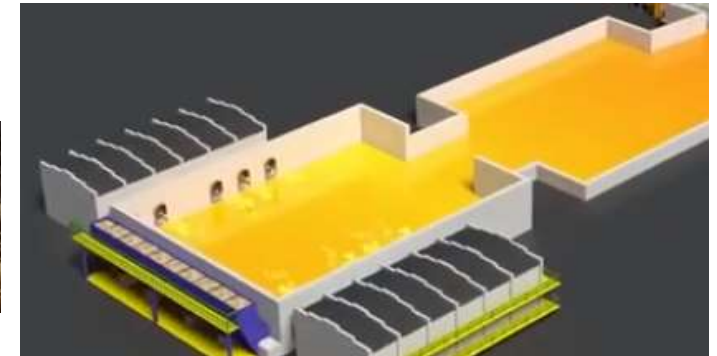
Coupe d'une ligne de float de l'enfournement jusqu'au stockage



Float (2 verre en fusion)

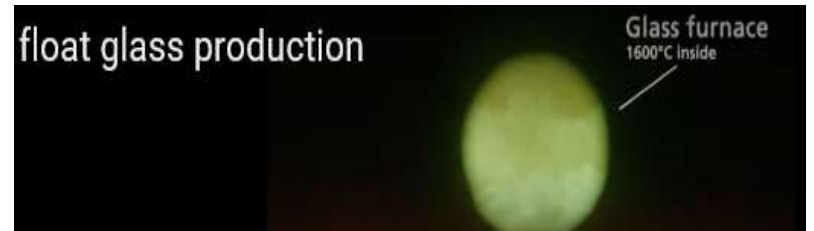


float glass production



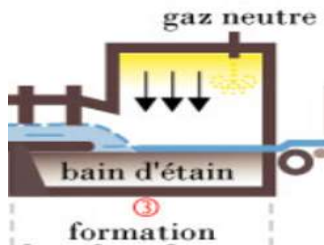
Construit en briques réfractaires chauffées à 1550°C et contenant 2000 tonnes de verre en fusion. La première partie est chauffée par des brûleurs transversaux avec inversion programmée. La seconde partie est pour l'affinage avant la coulée. Les fumées sont filtrées et récupération des cendres réinjectées dans le four.

float glass production

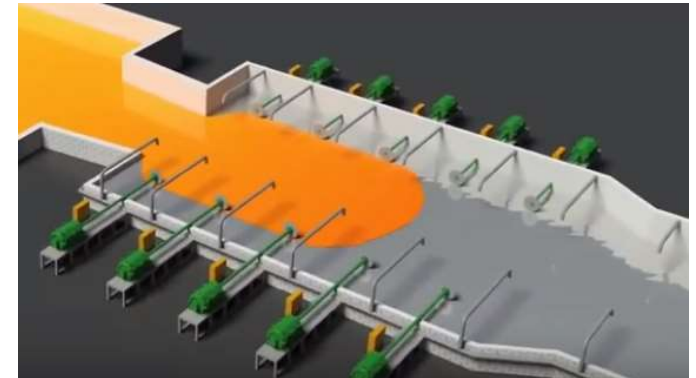
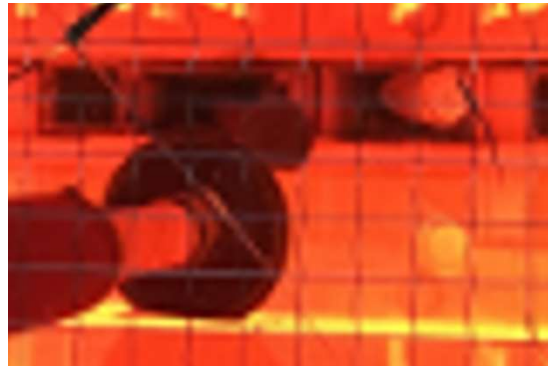


70 m

Float (3 formation du ruban de verre)

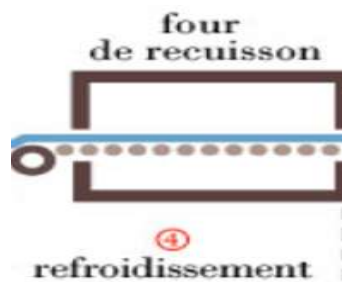


Le verre affiné arrive par le canal et est déversé sur le bain d'étain à 1100 °C. Le bain est maintenu dans une atmosphère réductrice (Azote et Hydrogène) afin d'éviter toute oxydation et adhérence verre/étain. Le verre s'étale naturellement entre 5 et 6 mm et à l'aide des roues dentées (top-rollers) on peut ajuster en étirant ou en repoussant l'épaisseur du ruban de verre (entre quelques dixièmes d'épaisseur à 20 mm environ).



70 m

Float (4 refroidissement)



Morceaux de verre ordinaire

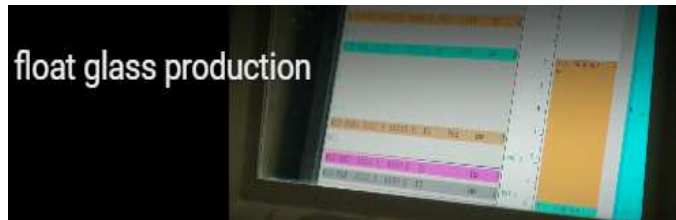
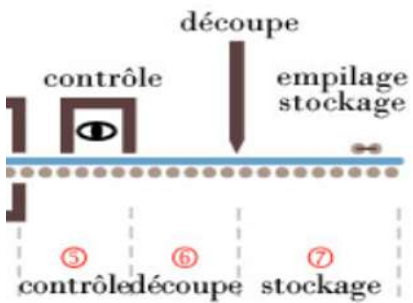


Pour relâcher les contraintes, le ruban est soumis à un traitement thermique de recuit dans un long four que l'on appelle l'étendrie. La température de refroidissement est contrôlée selon les spécifications.

Les rouleaux de l'étenderie sont parfaitement alignés ainsi le ruban de verre est d'une grande planéité et comporte des contraintes internes idéales pour être découpé sans dévier.

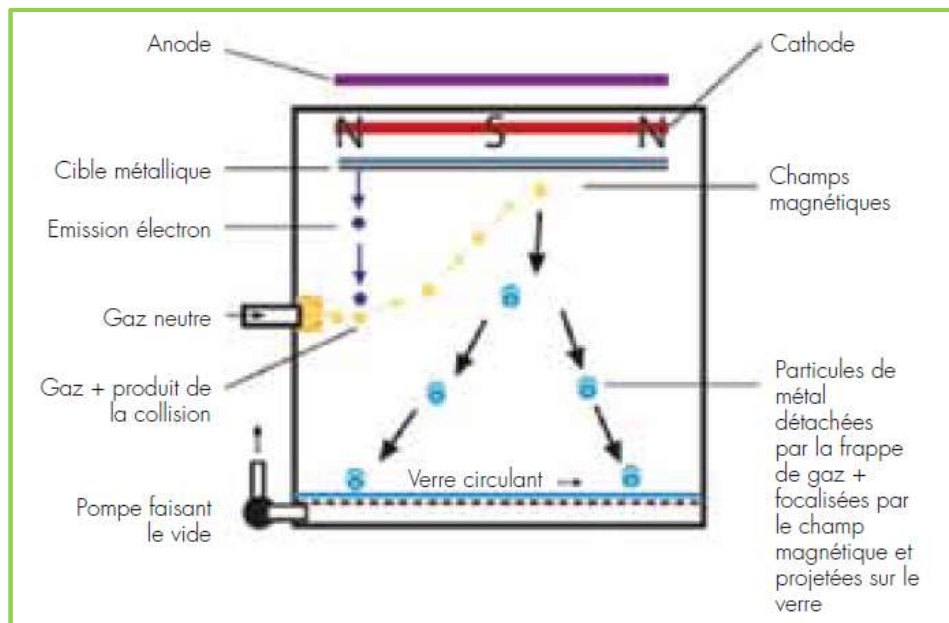
250 m

Float (5,6&7 contrôle découpe et stockage)



A la sortie de l'étendrie, un contrôle non destructif en continu permet de mesurer l'épaisseur ainsi que l'aspect qualité pour les choix des différents clients (défauts internes, lignes d'étirage etc...). La découpe se fait en PLF = 6000 x 3210 mm et les feuilles sont découpées transversalement en continu ainsi que le ruban longitudinal => recyclage. Les releveuses manipulent le verre et le déposent délicatement sur un chevalet et puis stockage avant d'être livré aux Clients.

Dépôts sous vide (pare-brise athermique)



La **pulvérisation cathodique assistée par magnétron** (technique de dépôt sous vide la plus utilisée pour déposer des couches minces sur verre de grande dimension). Elle consiste à accélérer les ions d'un plasma dans un vide partiel en direction d'une cible constituée de la matière à déposer et portée à un potentiel négatif (cathode).

L'épaisseur de couche est de l'ordre de 2000 Angström



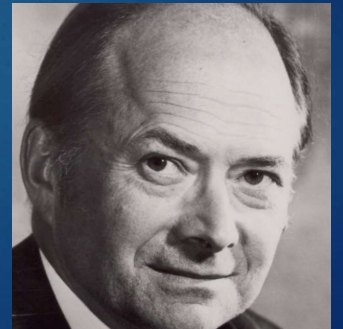
Avant

Les mélanges que forment la matière première ont permis **avec le verre flotté de fabriquer une glace parfaite en géométrie et en optique**

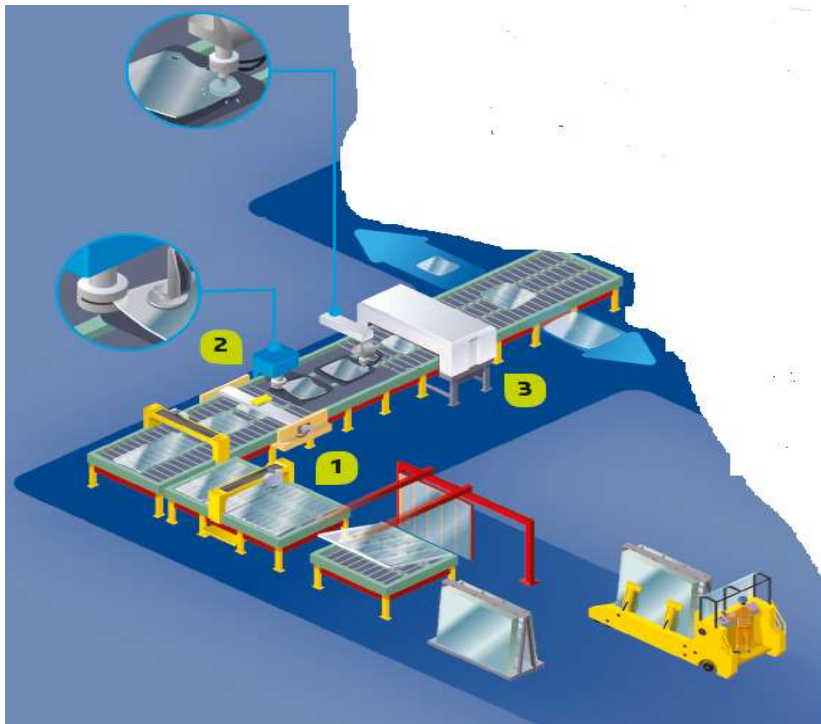
Le verre plat obtenu => verre primitif destiné à être transformé



Avec



Transformation => préparation du verre



PRÉPARATION DU VERRE

- 1** ► Dépilage et découpe des plateaux de verre *float* en primitifs.
- 2** ► Découpe de chaque primitif en forme et façonnage du bord du verre. Pour les lunettes arrière et les vitres latérales, possibilité de perçages à la demande du client.
- 3** ► Lavage et séchage.

Transformation => verre feuilleté

PARE-BRISE FEUILLETÉS

4 ► Sérigraphie, sur l'un des deux verres, d'une bordure d'émail qui contribue au design et à la protection du collage sur la carrosserie. Elle contient les éléments réglementaires et de typologie du vitrage.

5 ► Appairage à l'entrée du four : positionnement ensemble sur un même outillage de deux feuilles de verre.

6 ► Chauffe à 600 °C dans le four et formage par effet de gravité, puis refroidissement progressif.

7 ► À la sortie du four, désappairage des deux feuilles de verre, lavage et séchage.

8 ► Dans la salle blanche, insertion d'une couche intermédiaire de PVB (Polyvinyle de butyral) entre les deux feuilles de verre.

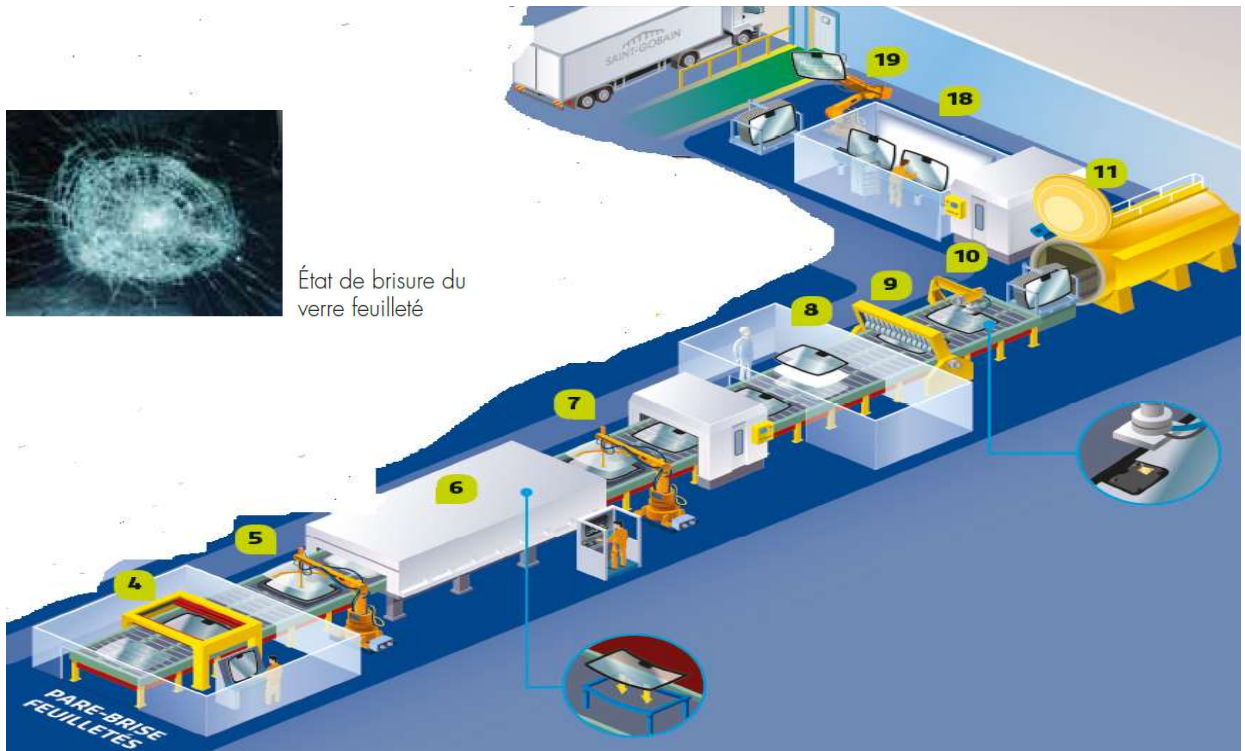
9 ► Dégazage par calandrage.

10 ► Selon les besoins des clients, collage d'embases de caméras, rétroviseurs et divers capteurs.

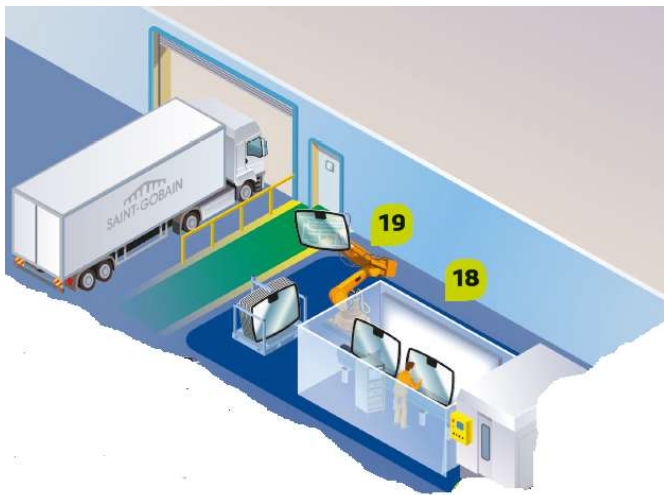
11 ► Autoclavage : dégazage complet pour l'adhérence définitive du verre et du PVB. À leur sortie, les pare-brise sont totalement transparents.



État de brisure du verre feuilleté

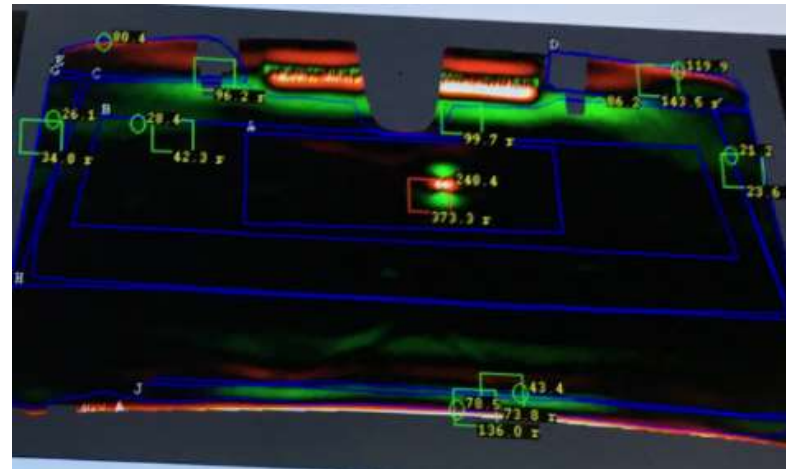


Transformation => verre feuilleté



CONTRÔLE ET CONDITIONNEMENT

- 18** ► Contrôles finaux à 100 %.
- 19** ► Emballage et conditionnement.



Transformation => verre trempé

LUNETTES CHAUFFANTES

- 12 ► Sérigraphie d'une bordure d'émail (cf. étape 4).
- 13 ► Sérigraphie des éléments fonctionnels en pâte d'argent (réseau de dégivrage, antenne radio, GPS ou alarme).
- 14 ► Chauffe et formage dans le four à plus de 600°C. Puis trempe par refroidissement brutal, qui garantit la résistance mécanique du verre.
- 15 ► Soudure de différents connecteurs.

VITRES LATÉRALES

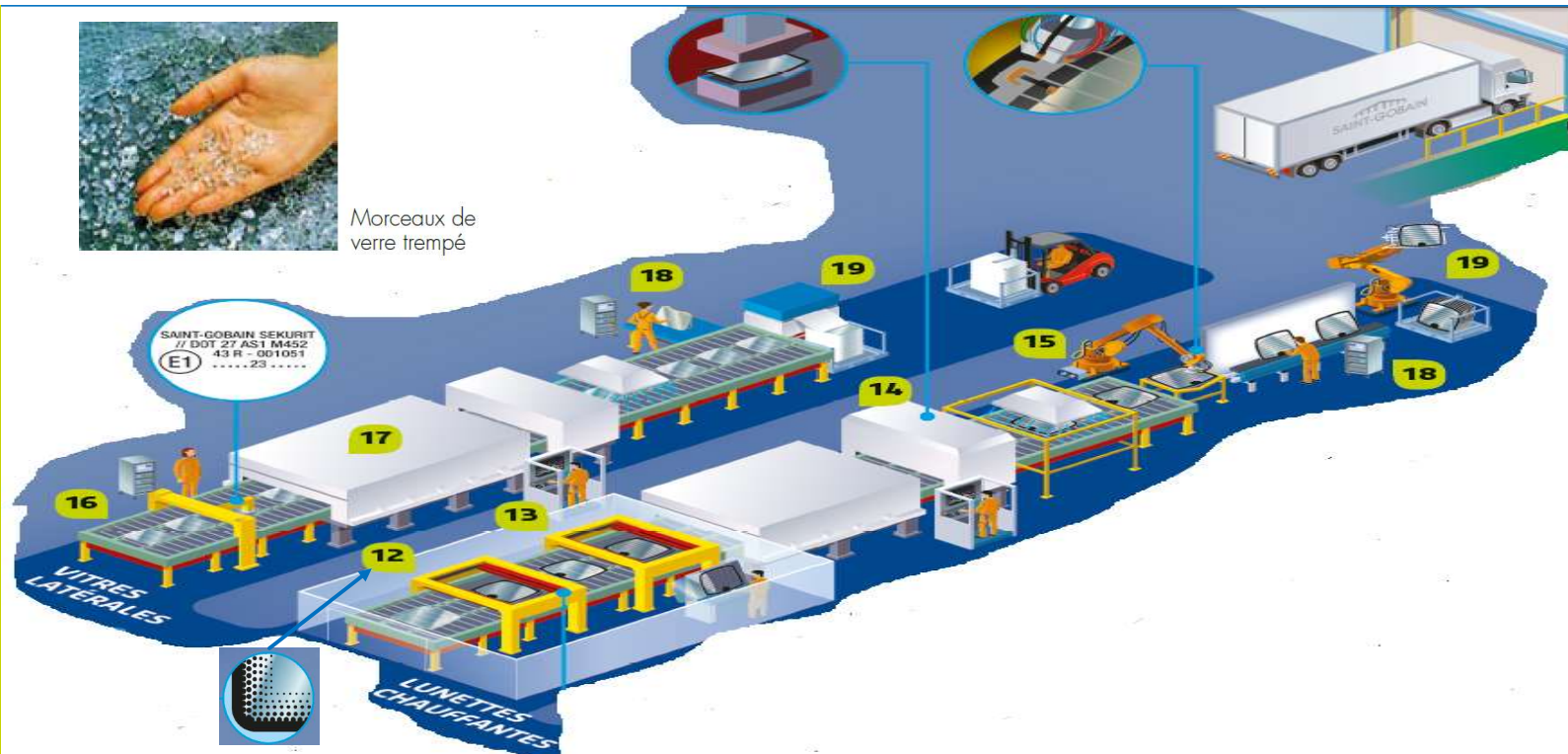
- 16 ► Sérigraphie des éléments réglementaires et de typologie du vitrage.
- 17 ► Chauffe et formage dans le four à plus de 600°C, puis trempe par refroidissement brutal.

CONTRÔLE ET CONDITIONNEMENT

- 18 ► Contrôles finaux à 100 %.
- 19 ► Emballage et conditionnement.



Morceaux de verre trempé



Pare-brise

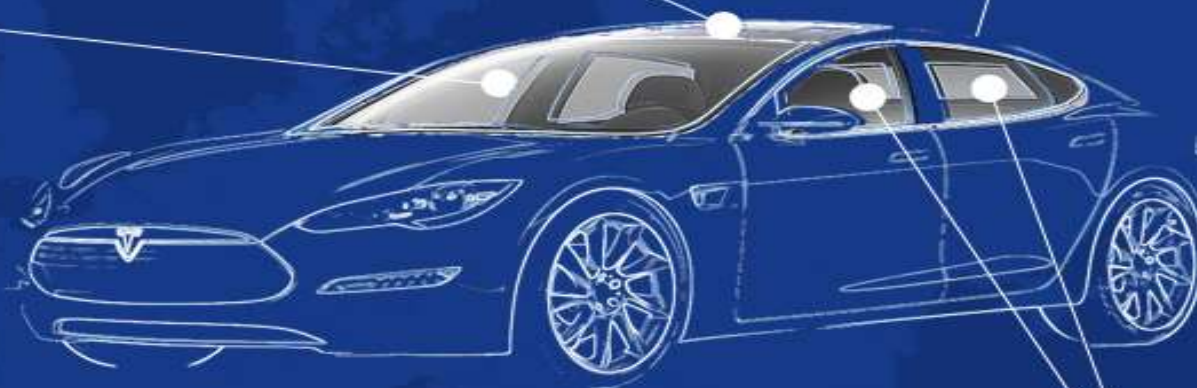
- ▶ Affichage tête haute 
- ▶ Chauffant à couche 
- ▶ Chauffant 
- ▶ Capteur intégré 

toits

- ▶ Fenêtre intelligente 

lunettes

- ▶ Protection anti UV 



latérales

- ▶ Protection anti UV 
- ▶ Joints 
- ▶ Enjoliveur 
- ▶ Module (division bar) 

- ▶ Conception d'antenne 
- ▶ Vitrage mince 
- ▶ Vitrage ultra mince 
- ▶ Efficacité énergétique 
- ▶ Vitrage acoustique 
- ▶ Vitrage coloré 
- ▶ « Patterning » 

Valeur ajoutée sur le verre => produit fini



Pare-brise
chauffant



Pare-brise
chauffant à couche



Intégration
de capteurs



Vision
tête haute

Valeur ajoutée sur le verre => produit fini



Patterning



Formes complexes

Valeur ajoutée sur le verre => produit fini



Efficacité énergétique

Valeur ajoutée sur le verre => produit fini



Propriétés thermiques, optiques et mécaniques

► Les propriétés thermiques

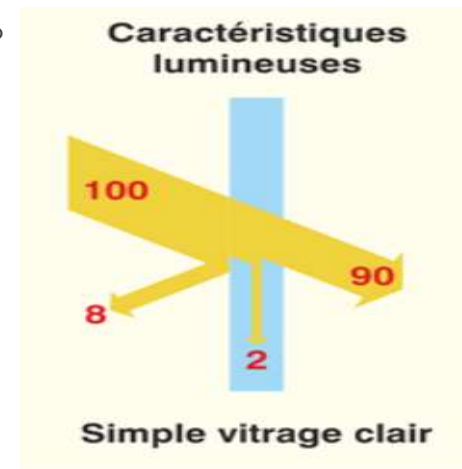
- La température de transition vitreuse (T_g) caractérise le passage de l'état vitreux à l'état caoutchouteux.
- Pour la mise en forme (trempe ou feuilletage) il faut ajouter 100°C environ soit une température de 600°C .
- Le verre est un bon isolant thermique avec une conductibilité thermique de $1\text{W/m}^\circ\text{C}$ (50 x moins que le cuivre).



Propriétés thermiques, optiques et mécaniques

► Les propriétés optiques (TL)

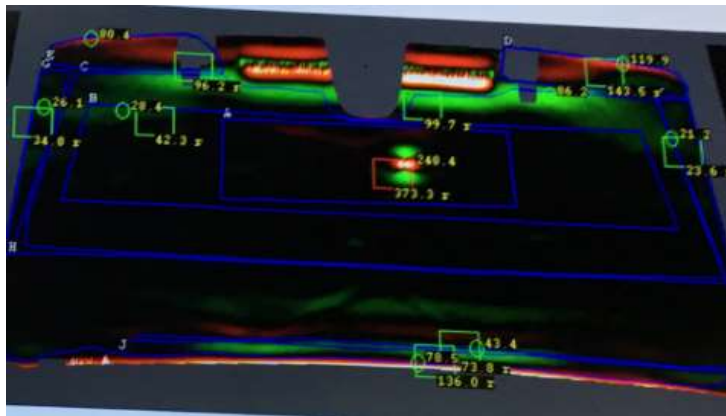
- La transmission lumineuse (TL): lorsqu'un rayon lumineux est intercepté par une paroi une partie est réfléchiée, une autre partie est absorbée et une partie est transmise. L'exemple ci-dessous d'un simple vitrage clair = 0,9 (90%)
- Pour un pare-brise la TL mini réglementaire est 75%
- La teinte du vitrage (verre teinté) ou les couches minces modifient la TL et la diminuent.
- L'indice de réfraction $n = 1,52$



Propriétés thermiques, optiques et mécaniques

► Les propriétés optiques (déformation optique par transmission)

- La déformation optique sur un pare brise est mesurée à 100% et doit respecter des normes réglementaires => caméras spécifiques



Propriétés thermiques, optiques et mécaniques

► Les propriétés mécaniques

- **Densité : 2500 kg/m³**

Un verre de 4 mm d'épaisseur pèse 10kg/m².

- **Module d'élasticité : 70 000 MPa**

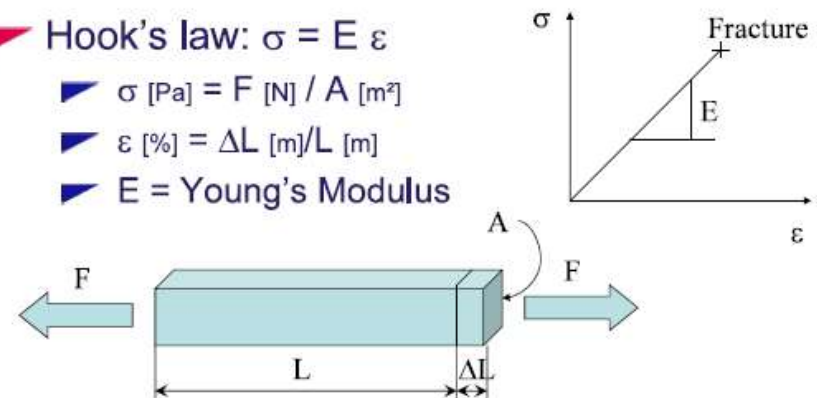
Le module d'élasticité est déterminé, soit par l'allongement élastique d'une fine baguette, soit par la courbure d'une baguette avec une section circulaire ou rectangulaire.

► Hook's law: $\sigma = E \varepsilon$

► $\sigma \text{ [Pa]} = F \text{ [N]} / A \text{ [m}^2\text{]}$

► $\varepsilon \text{ [\%]} = \Delta L \text{ [m]} / L \text{ [m]}$

► $E = \text{Young's Modulus}$





Je vous remercie de votre attention



Pour tout renseignement, me contacter à
l'adresse courriel suivante :

► philippeleroy763@gmail.com

