

Verre, le Futur

Vers des verres (enfin) plus résistants?

Yann Gueguen

Responsable du Département Mécanique et Verres

Institut de Physique de Rennes



Mécanicien... du verre?

Quel est ce métier?

Pourquoi augmenter la résistance mécanique d'un verre?

- A dimensions égales, le verre sera plus résistant, donc plus durable: *ré-emploi, tenue en service*



Verre « mécanique »:

- vitrage (vent, sol, balustrade),
- fibres (composite),
- bouteilles (chocs, pression)



RETOUR VERRE LE FUTUR

CAVISTE

RETOUR VERRE
LE FUTUR



© 2008 Musée du Louvre
Département des Antiquités orientales

-3000



© NASA
Cupola de l'ISS

2010



iPhone 238?

2030?

Du verre dans les fenêtres?

Des fenêtres?



Dans les régions froides, moins il y avait d'ouvertures mieux c'était!

Pas de fenêtre... trou au plafond?



Dans les régions chaudes, les fenêtres apportent la lumière



Dans les régions tempérées: petites ouvertures, volets, voire ouvertures bouchées par de l'argile en hiver

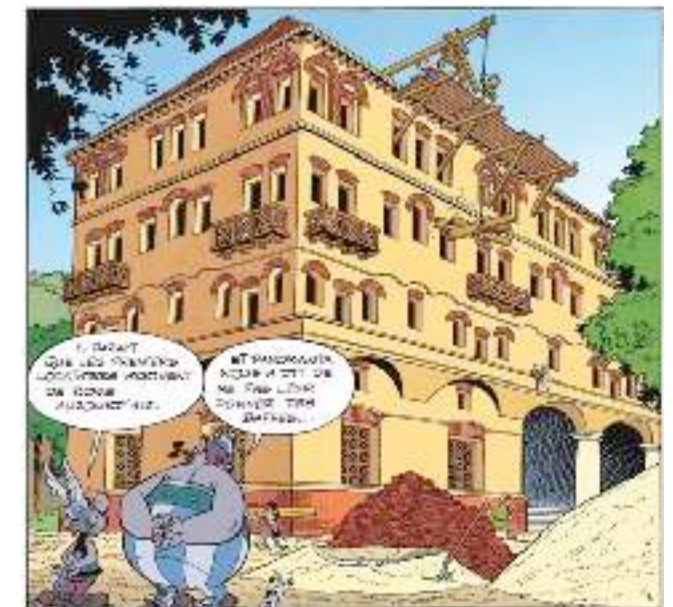
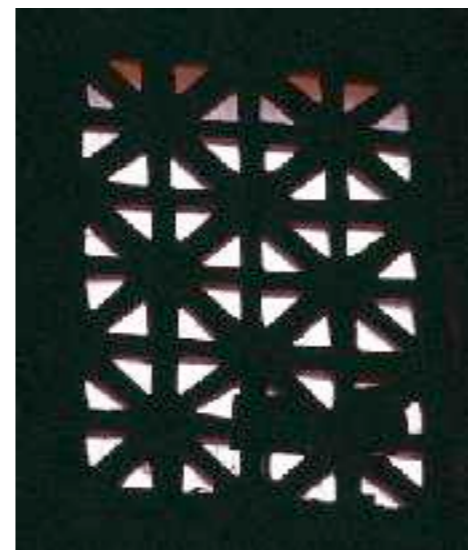
RETOUR VERRE LE FUTUR

Du verre dans les fenêtres?

L'atrium (cour intérieure) fournissait la lumière: pas de fenêtre vers l'extérieur et un bassin central pour réfléchir la lumière.



Caillebotis en bois, en terre cuite, en acier ou en pierre taillée.



RETOUR VERRE LE FUTUR

Du verre dans les fenêtres?



Version moderne



Anders Moen Kaste / sciencenorway.no

Estomac de vache



Anders Moen Kaste / forskning.no

« *sjåskinn* »

Nom des peaux lorsqu'utilisés comme fenêtre (Norvège)



1066

Utilisation de peaux, de vessies, de pierre (albâtre, sélénite ou mica... *lapis specularis*)

Du verre dans les fenêtres?

Du verre comme vitres?



Alabastron (vase)

100 à 10 av. JC, romain
British Museum



<https://www.glassway.vda.it>

Modelage sur noyau d'argile

- Jusqu'en 2000 av. JC: les verres sont opaques (on ne pense pas à en faire des vitres!)
- 500 av. JC: premier verre transparent connu (Perse)
- Premier siècle av. JC: apparition du soufflage



Alabastron (vase)
600 av. JC, phénicien
Met Museum



100-0 av. JC
© Musée du Louvre,
Dist. GrandPalaisRmn
Patrick Lebaube

Problème de transparence, de technique et probablement de coût!



300 à 200 av. JC
© GrandPalaisRmn (musée du Louvre)
Hervé Lewandowski

Du verre dans les fenêtres?

Du verre comme vitres?

Par coulé (mi 1^{er}-5^{ème} siècle)

D'abord en Europe de l'Ouest, se répandent vite vers l'est

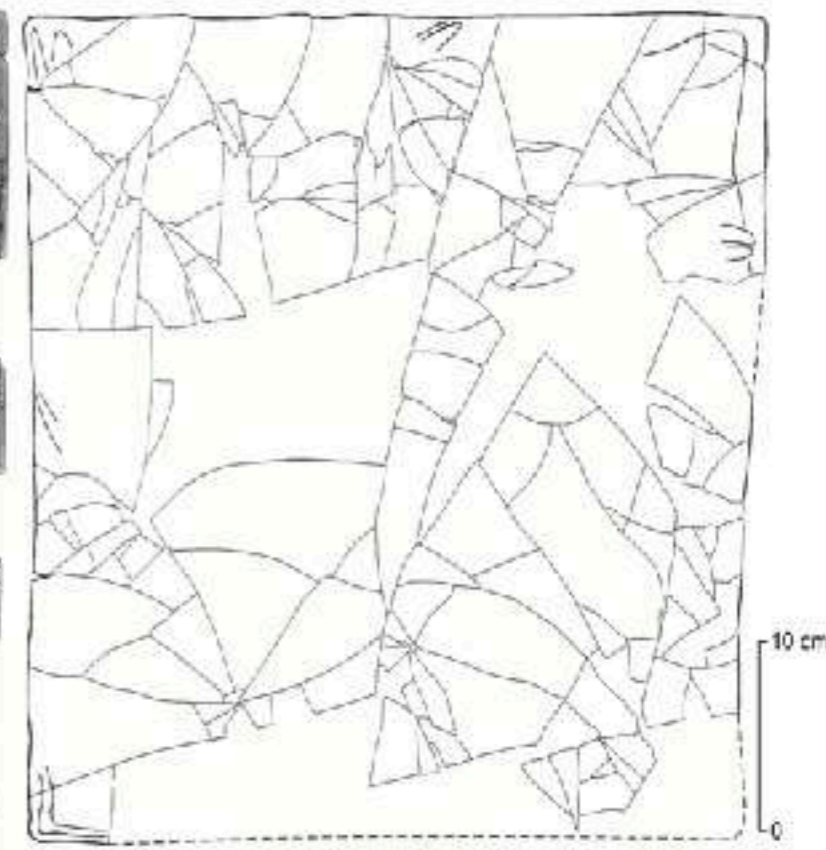
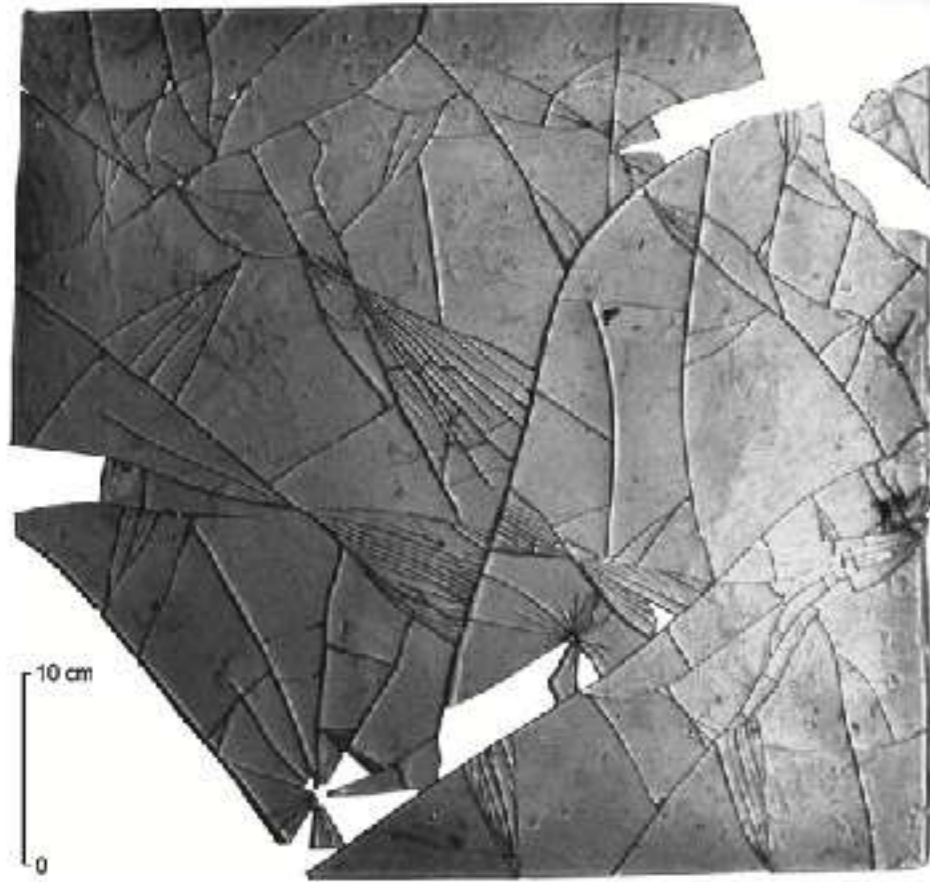


© Géraldine Frère



Support en pierre, bois, terre-cuite...

RETOUR VERRE LE FUTUR



150-250 ap. JC

Record? Pompéi: 0.7 m²

Bleu-Vert jusqu'en 100 ap. JC, translucide

Ajout de manganèse à partir de 150 ap. JC: verre de plus en plus clair

Riche en natron pour avoir le temps d'étaler le verre

Diversité et évolution du vitrage de l'Antiquité et du haut Moyen Âge : un état de la question

Danièle Foy Souen D. Fontaine

Gallia Année 2008 65 pp. 405-459

RETOUR VERRE LE FUTUR

Du verre soufflés dans les fenêtres



300-400 ap. JC

© 2008 Musée du Louvre, Dist. GrandPalaisRmn / Patrick Lebaube



Domine le verre à vitre jusqu'en 300 ap. JC, des traces de commerce jusqu'en 350 ap. JC
Problème: une face granuleuse et mate



Experiments in Early Window Glass
Denise Allen, Mark Taylor
Journal of Glass Studies,
2023, Vol. 65 (2023), pp.
39-60

200-300 ap. JC
(Egypte?)



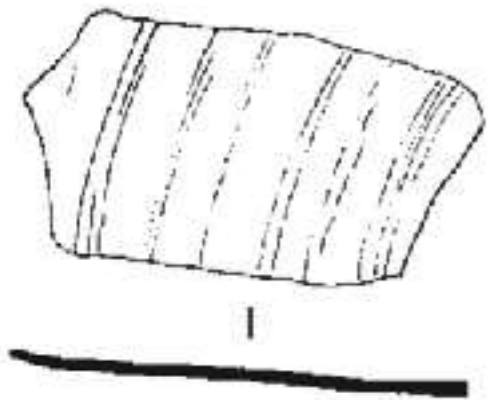
Du verre dans les fenêtres

Cive/Crown: >400 ap. JC ?, Moyen-Orient
Plus tard en occident

« Pourtant, s'il était techniquement possible de réaliser des vitrages en forme de disque dès le IIe s., l'archéologie ne nous en livre aucune trace avant le IVe s. et les mentions les plus abondantes et les plus fiables n'apparaissent qu'aux Ve-VIe s. et sont pratiquement toutes concentrées en Méditerranée orientale. »

*Danièle Foy Souen D. Fontaine
Gallia Année 2008 65 pp. 405-459*

Technique similaire à la production d'assiette...
source de confusion pour les archéologues



2 cm
0

Vers 500 ap. JC

*Danièle Foy Souen D. Fontaine
Gallia Année 2008 65 pp. 405-459*



Vitres faites avec les boudines
(« cul de bouteilles »)



Glass crown
disk with
panes
laid out



Individual panes were cut after a glass crown cooled. The best panes were near the edge, where the glass was thinnest.

Corning Glass Museum

RETOUR VERRE LE FUTUR

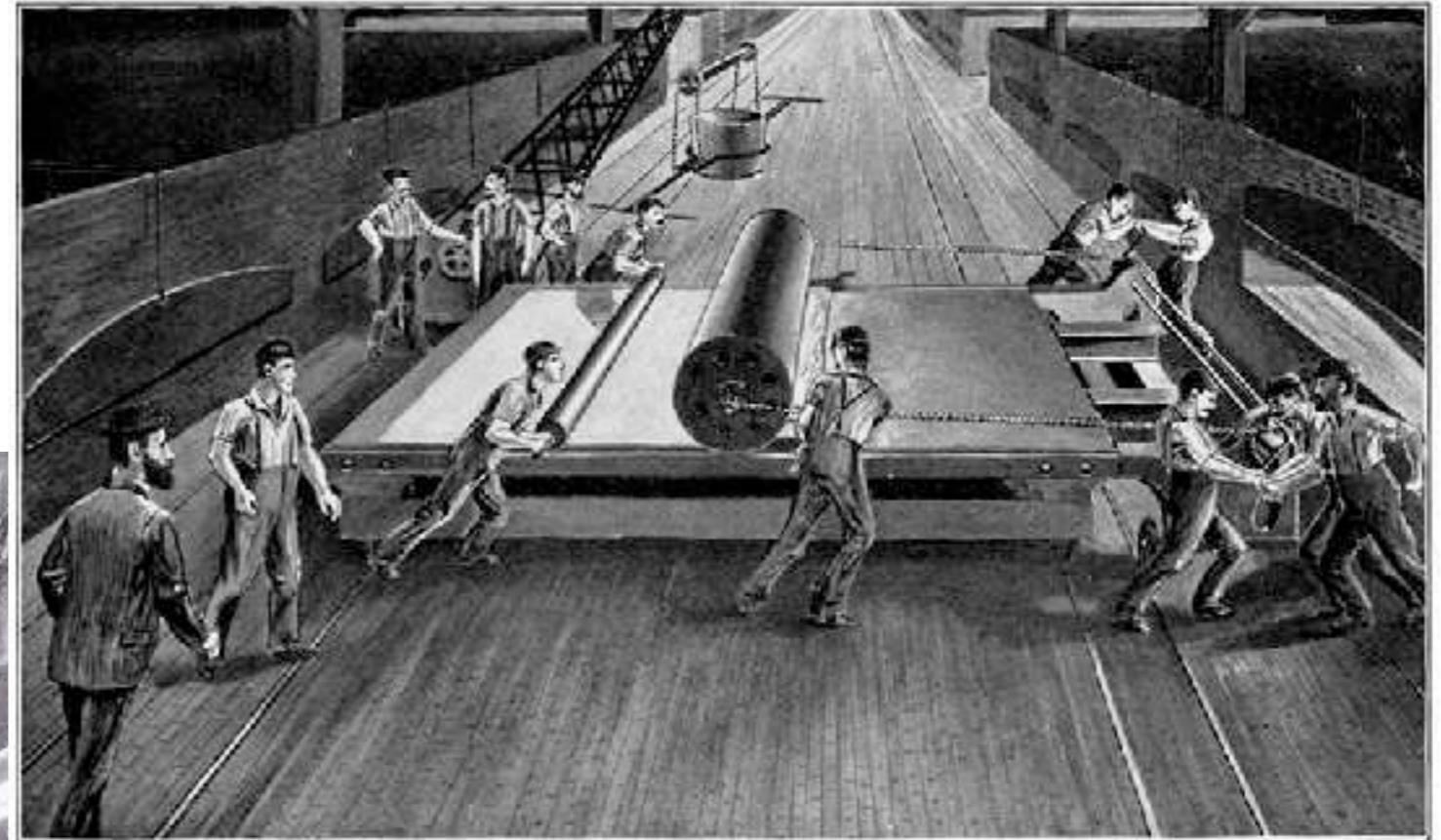
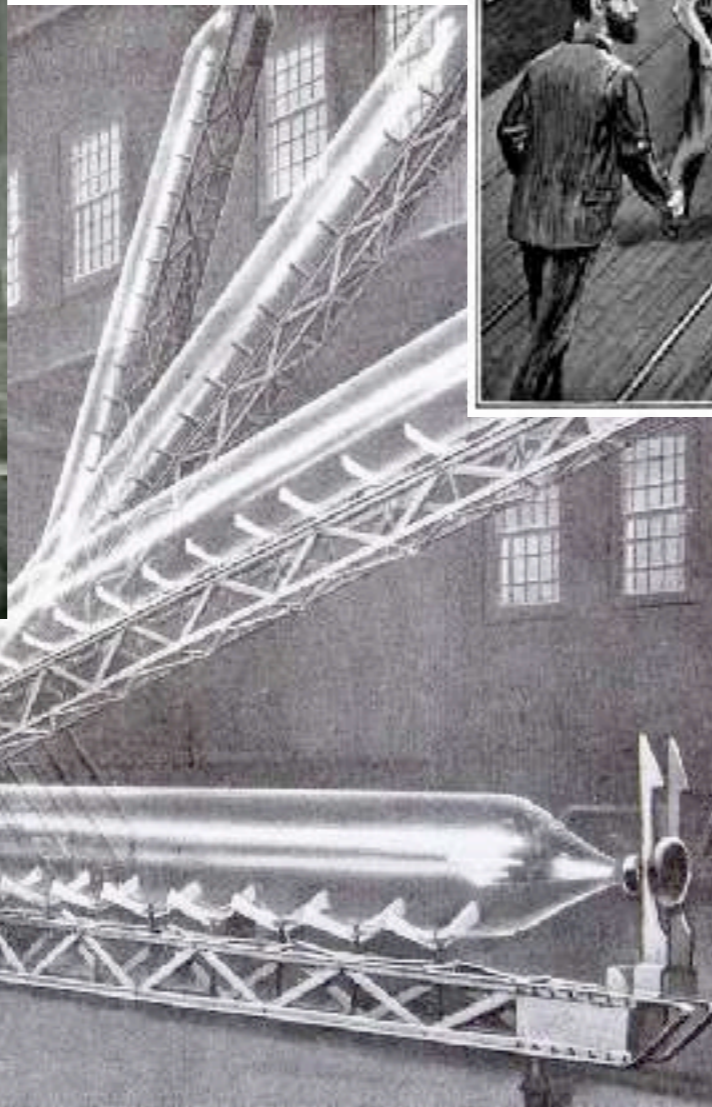
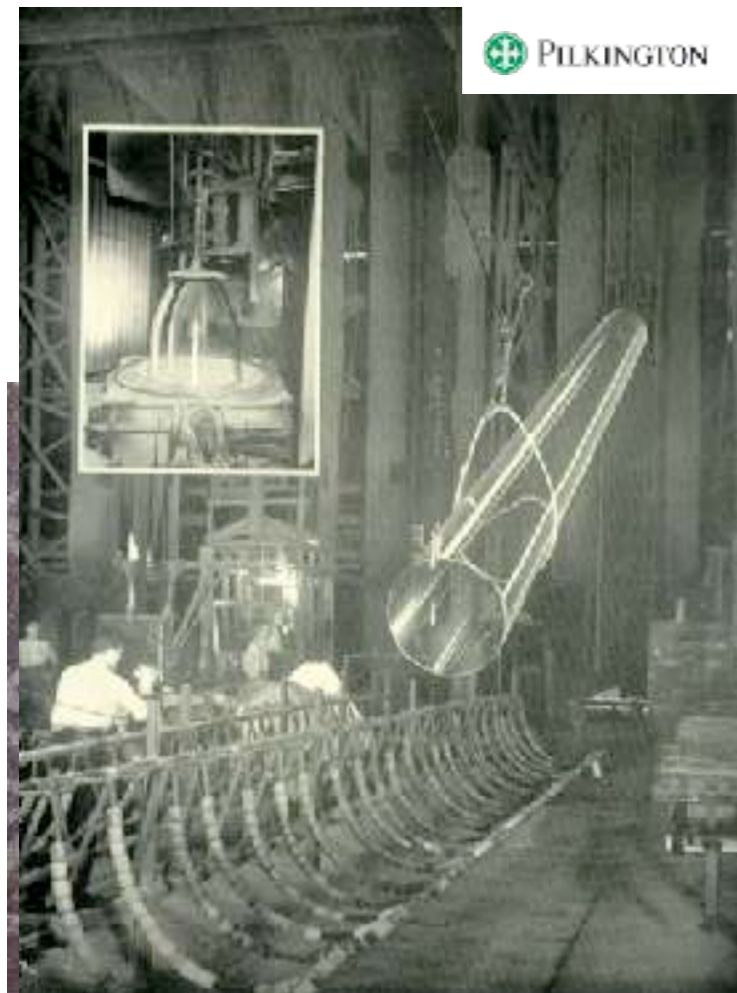
1688 Manufacture Royale de France (Saint Gobain)



Étapes de polissage nécessaires (32 jours)...

RETOUR VERRE LE FUTUR

Perfectionnement, mécanisation



 HOLLANDER
HISTORIC

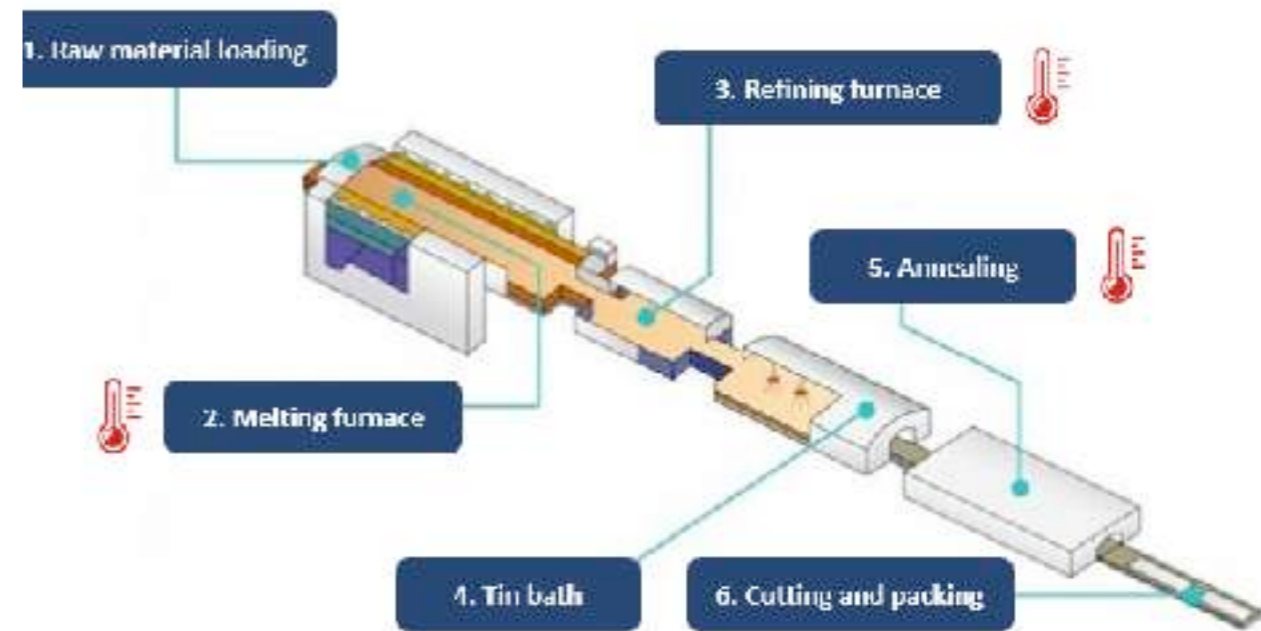
→ 1950

RETOUR VERRE LE FUTUR



re au chalumeau

1952 Alastair Pilkington, idée du « float »



Nascimento, M. L. F. (2014). Brief history of the flat glass patent-Sixty years of the float process. *World Patent Information*, 38, 50-56.

Vitre dans les transports

- Calèche royale: 1599 (France)

« Although in England glass windows were common in houses before 1650, the kind of plate glass needed to withstand the rigors of carriage travel had to be imported from France. »

Coche de 1619



- Premier train public: 1825



© The Board of Trustees of the Science Museum

- Premier train vitré: 1838

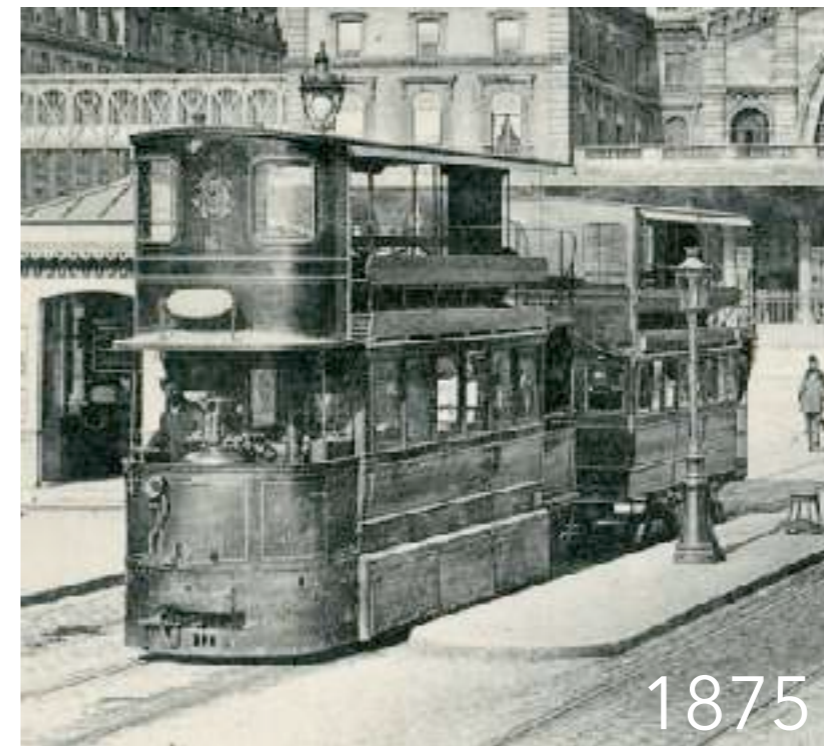
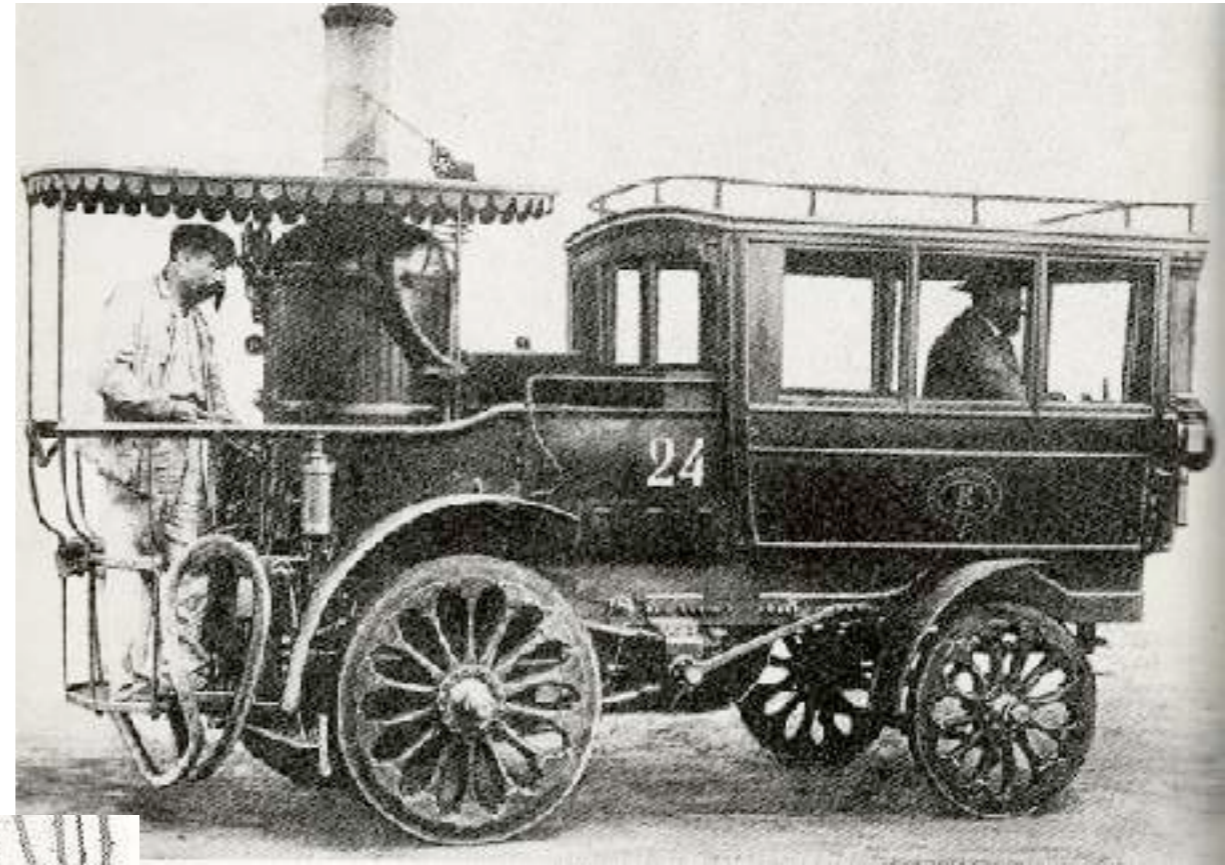


« Royal Mail Train »

RETOUR VERRE LE FUTUR

Vitre dans les transports

La Nouvelle (1880)
Amédée Bollée
Véhicule à vapeur



Vitre dans les transports

- Première voiture à moteur à explosion: 1885 (*Benz Patent-Motorwagen*)



- Pare-brise courant: >1904

Renault Frères
voiturette
type B 1899



Darracq 1904



Roll-Royce Landaulet (1905)

RETOUR VERRE LE FUTUR



Rolls-Royce Phantom I limousine 1926

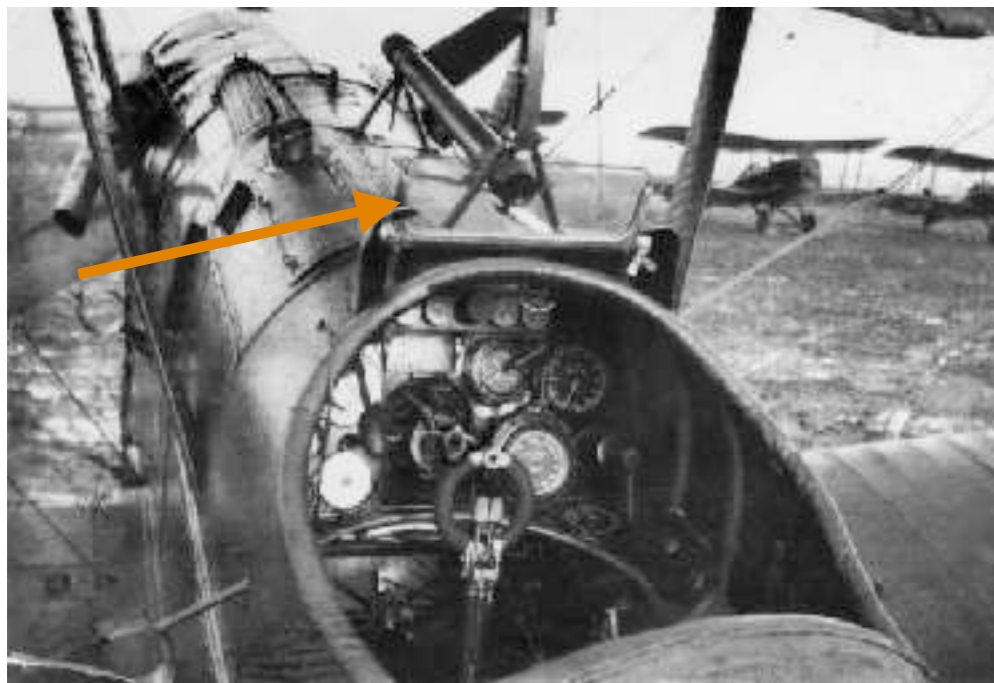


Vitre dans les transports

- Premier avion: 1903
(*Wright Flyer I*)



- Première verrière frontale: Première guerre mondiale



En cellulose? Triplex (verre-cellulose-verre) dès 1915



Royal aircraft factory SE5 (1917)



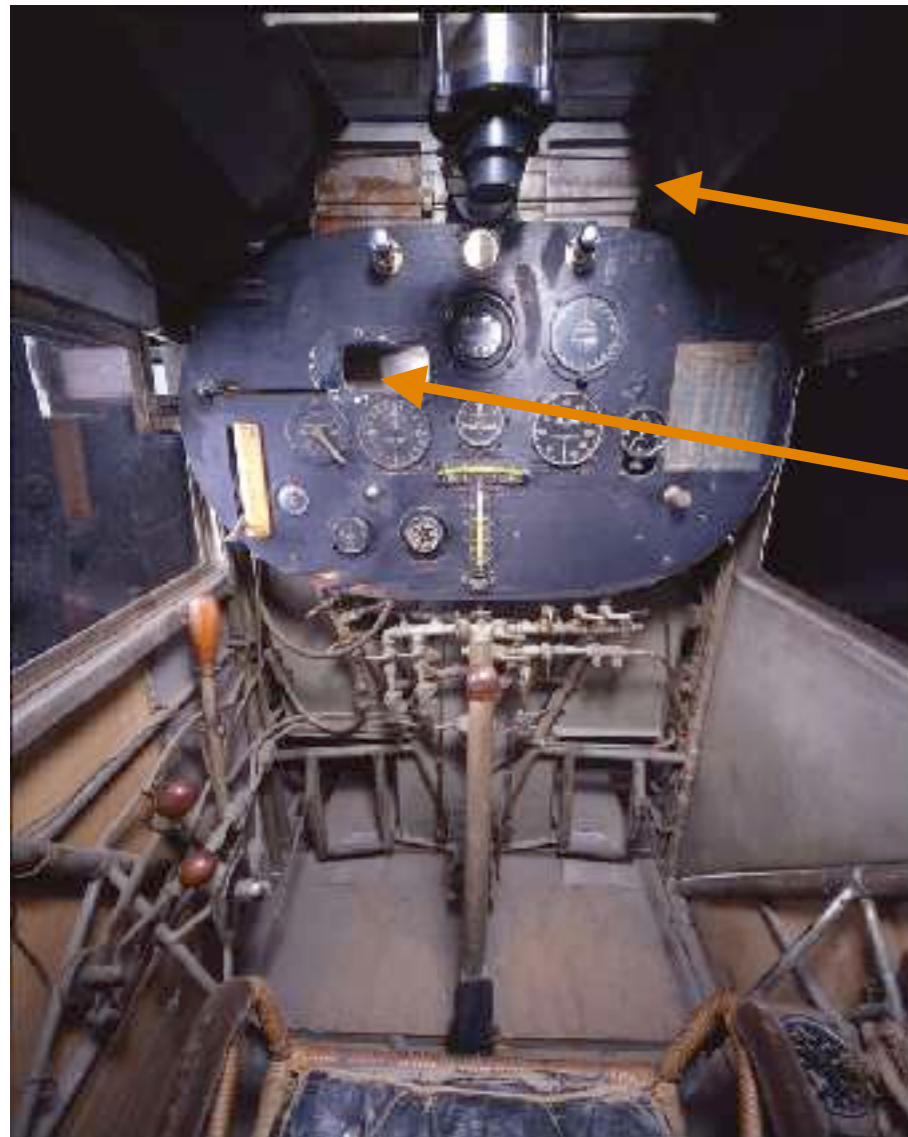
RETOUR VERRE LE FUTUR

Vitre dans les transports

● Entre deux guerres

« The airplane had no front windshield, but it had side windows. And he took them out and tucked them away, and they are at the Air and Space Museum. And I sense they might be this material [cellulose nitrate windows] as well. One day I'm going to find out. »

« Conserving Plastics in Early Aircraft Cockpits » Odile Madden



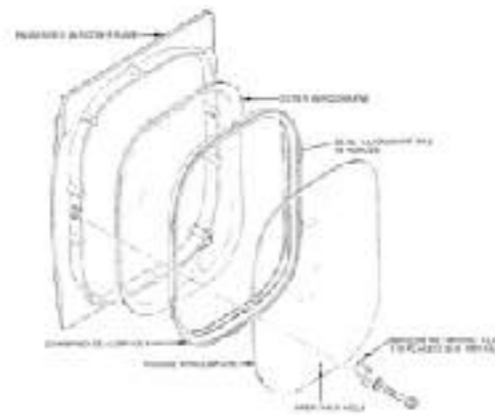
Pas de
pare-brise!

Périscop

Lookheed Vega >1927



2025: PMMA, polycarbonate



Vitre dans les transports

LZ 129 Hindenburg (1936-1937)



Cellulose? Polycarbonate? Verre?

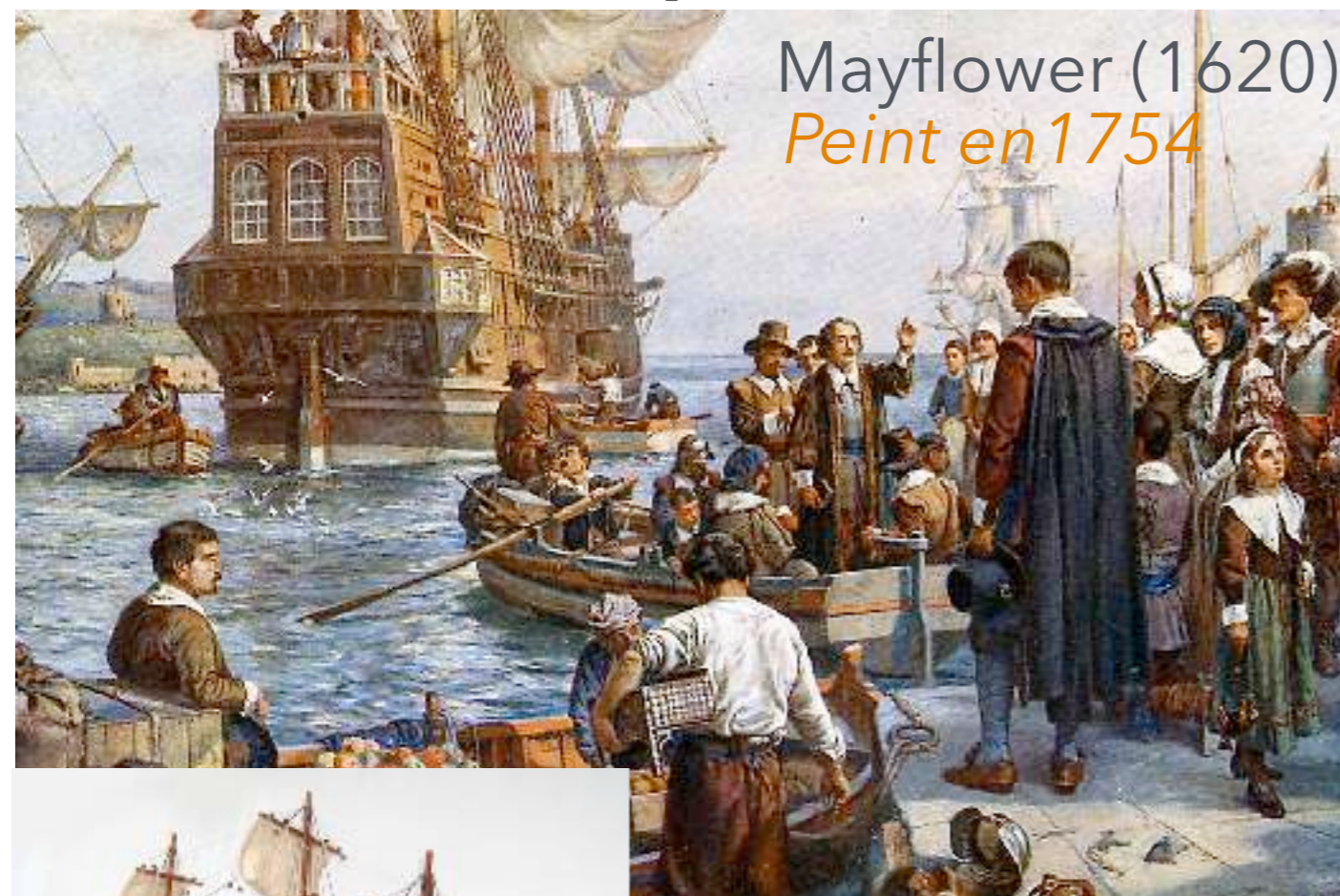
Vitre dans les transports

Vasa 1626



>1500?

Vitre dans les transports



Mayflower (1620)
Peint en 1754



Queen's Anne Revenge (1718)
« Barbe Noire »



Réplique moderne du
Mayflower

Vitre dans l'espace

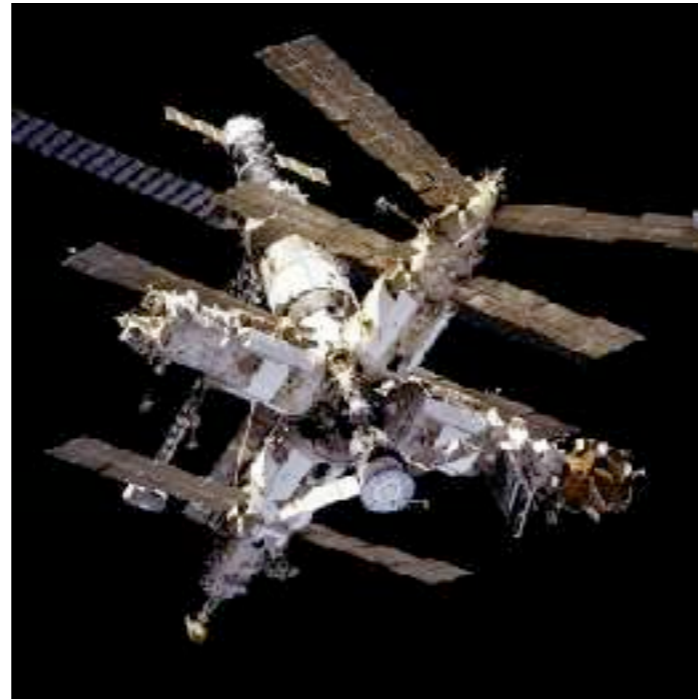
● Vostok I (1961)



RETOUR VERRE LE FUTUR

Vitre dans l'espace

● MIR (1986-2001)



● ISS (1998-...)

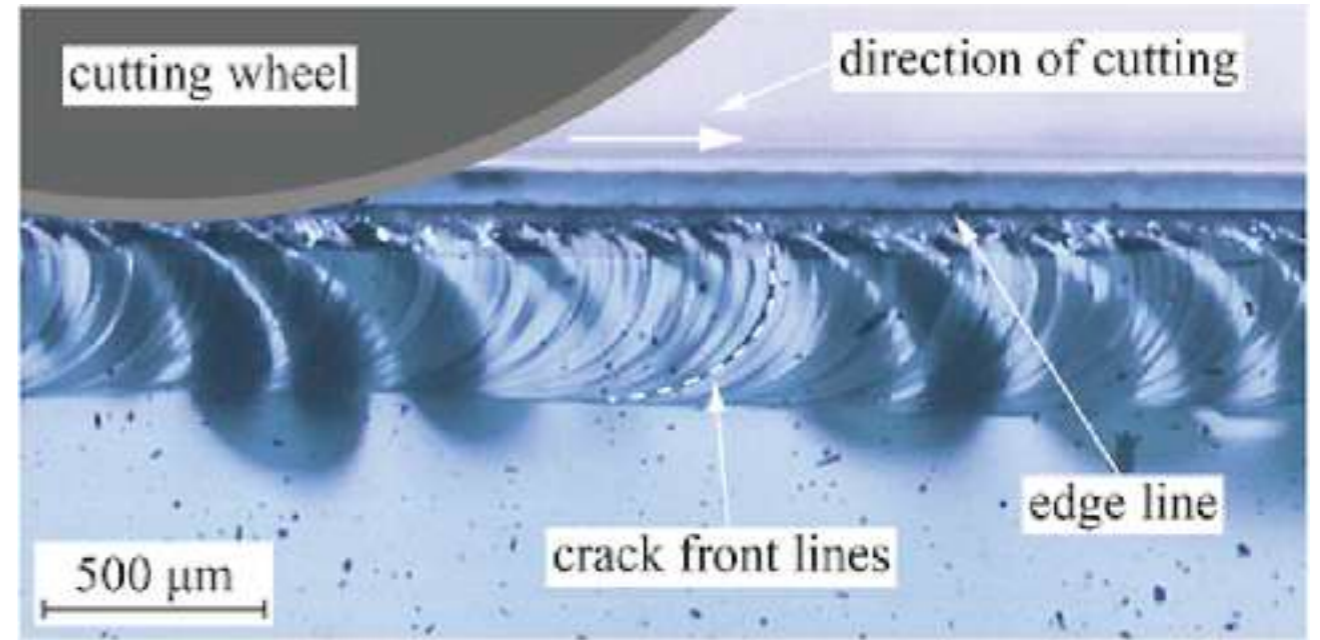
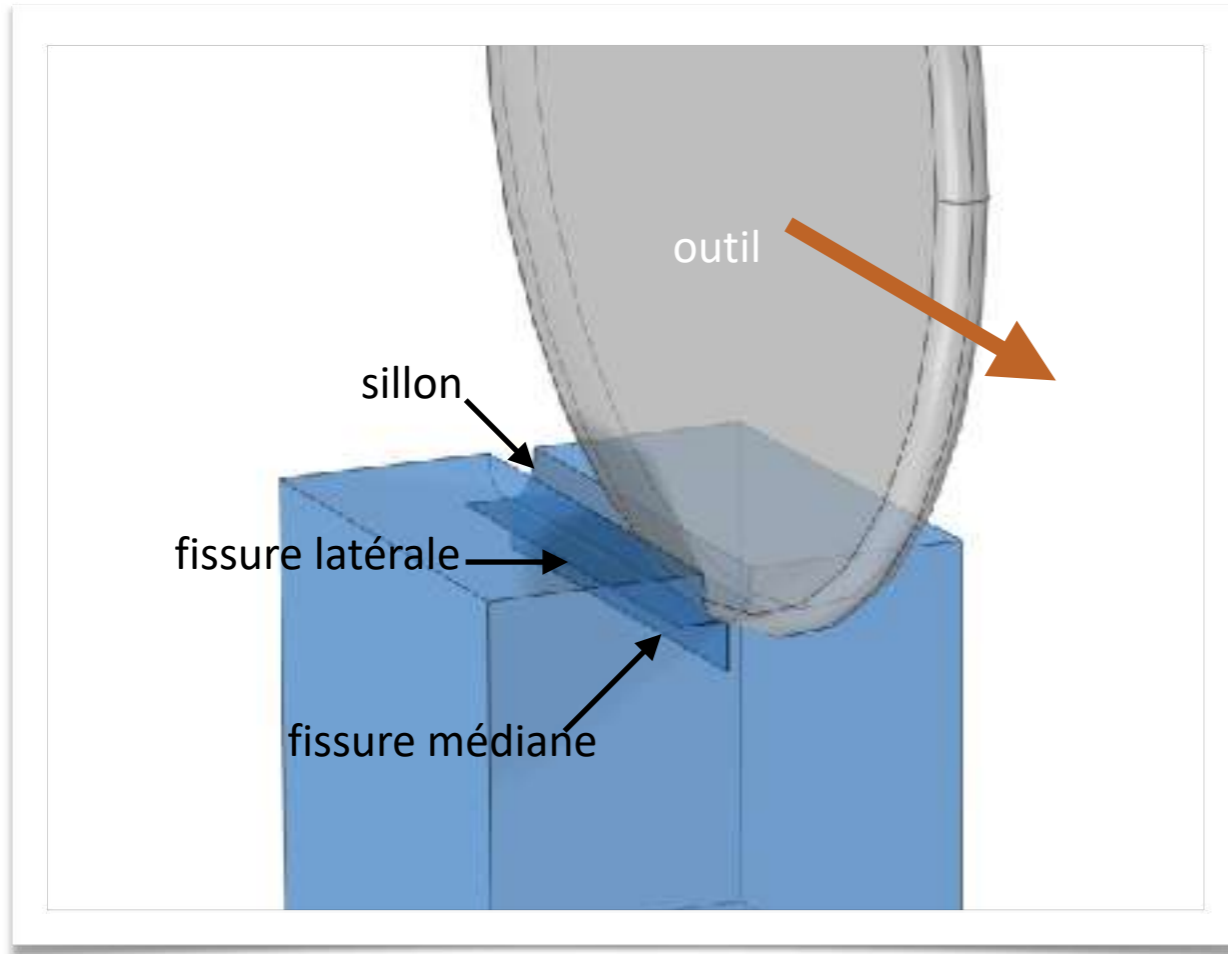


Feuilleté de silice ou de borosilicate

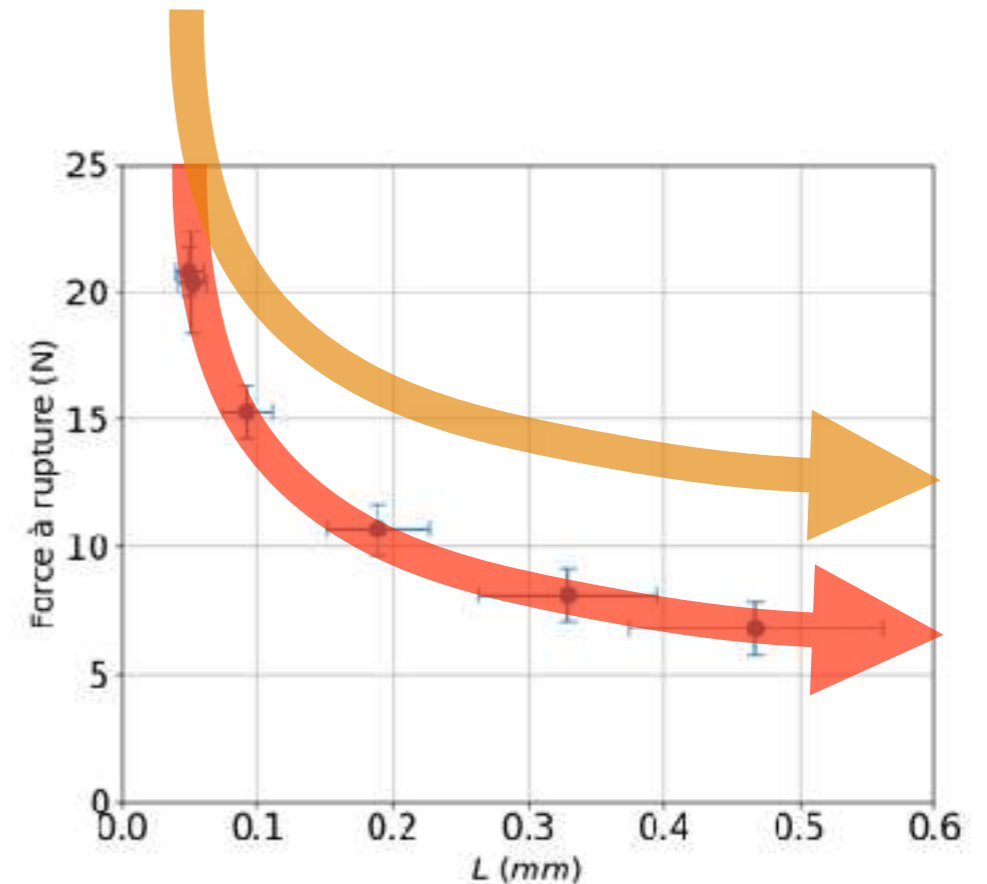
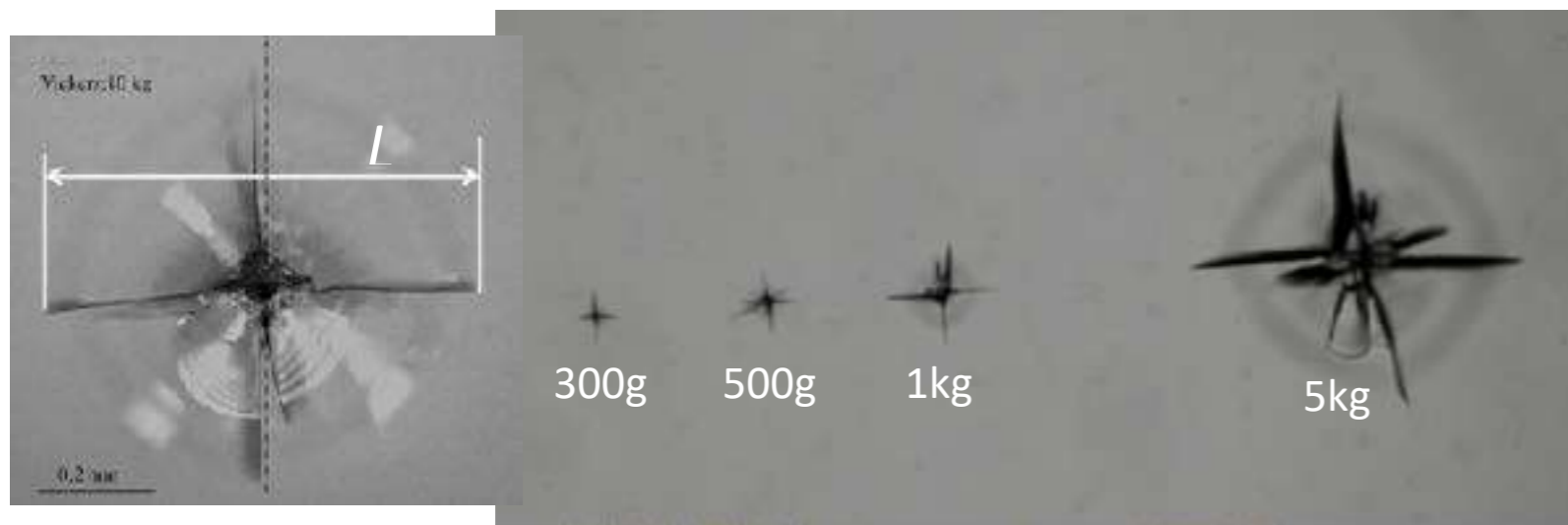
Améliorer les propriétés du verre



Qu'est-ce qui fait la résistance mécanique d'un verre?

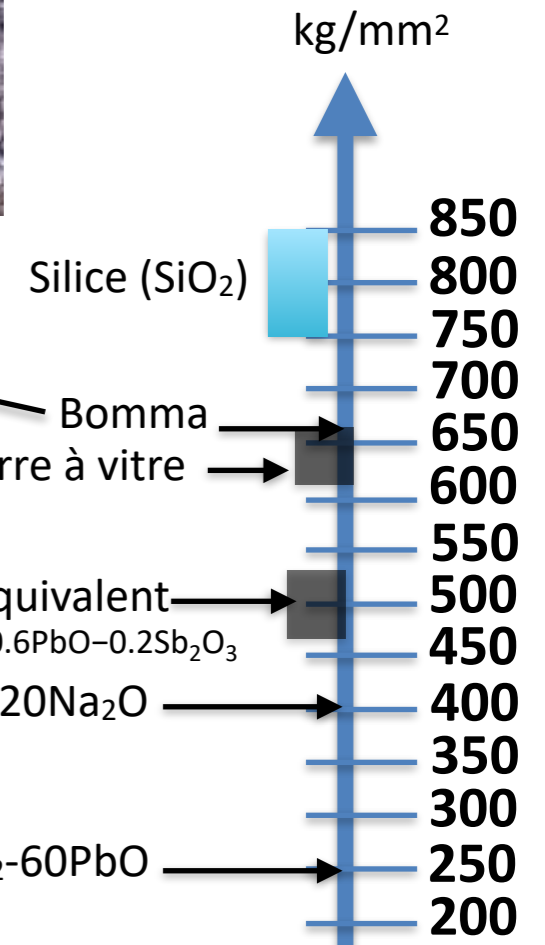


Müller-Braun S., *Glass Structures & Engineering*, 5, 3-25.



Qu'est-ce qui fait la résistance mécanique d'un verre?

● Dureté



● Résistance à l'initiation de fissure

| Load (N) | 49 | 9.8 | 4.9 | 2.9 | 1 | 0.5 |
|---|----|-----|-----|-----|---|-----|
| Composition (Na ₂ O-TiO ₂ -SiO ₂) | | | | | | |
| 10-4-86 | | | | | | |
| 10-7-83 | | | | | | |
| 10-10-80 | | | | | | |
| 15-4-81 | | | | | | |
| 15-7-78 | | | | | | |
| 15-10-75 | | | | | | |
| 20-4-76 | | | | | | |
| 20-7-73 | | | | | | |
| 20-10-70 | | | | | | |
| 25-4-71 | | | | | | |
| 25-7-68 | | | | | | |
| 25-10-65 | | | | | | |

● Résistance à la propagation de fissure



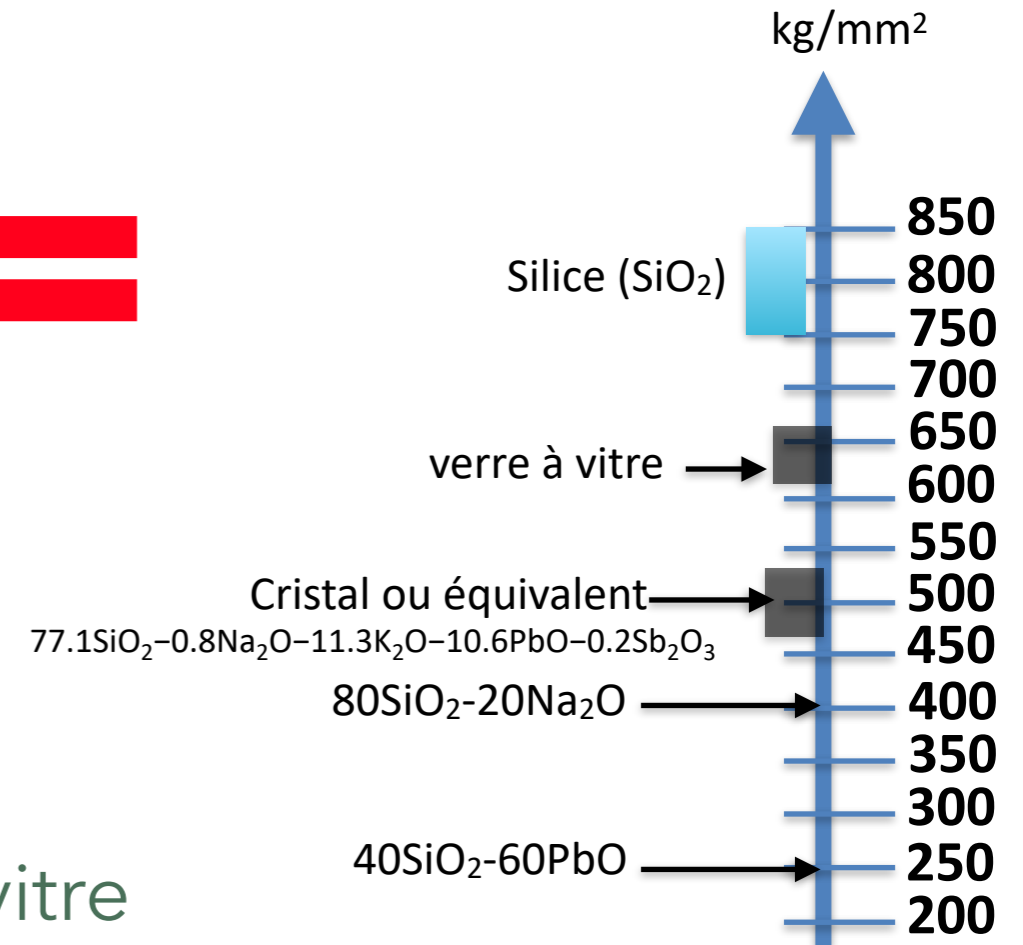
Changer la recette

| Verres Suasa (vitres) 31-476 ap. JC | Verres en Occident 0 à 600 ap. JC | Verres, Allemagne 780-1000 ap. JC | <i>Compositions en masse</i> Verre à vitre moderne |
|---|--|---|--|
| SiO ₂ : 70.2±1.3 % | SiO ₂ : 68±2 % | SiO ₂ : 57.6±7.3 % | SiO ₂ : 73±1 % |
| Na ₂ O: 18.7±1.0% | Na ₂ O: 18±1% | Na₂O: 1.6±1.0% | Na ₂ O: 14±1% |
| CaO: 6.0±0.6% | CaO: 6.8±1.1% | CaO: 17.9±4.5% | CaO: 9±0.5% |
| Al ₂ O ₃ : 2.4±0.1% | Al ₂ O ₃ : 2.5±0.5% | Al ₂ O ₃ : 2.9±0.9% | Al ₂ O ₃ : 0.15±0.05% |
| MnO: 0.75±0.4% | MnO: 1.1±0.8% | MnO: 1.4±1.6% | MnO: 0.0% |
| MgO: 1.0±0.2% | MgO: 0.7±0.2% | MgO: 3.7±1.6% | MgO: 4±0.1% |
| K₂O: 0.5±0.1% | K₂O: 0.6±0.2% | K₂O: 11.8±5.4% | K ₂ O: 0.03±0.01% |
| <p>Arletti, R., Vezzalini, G., Benati, S., Mazzeo Saracino, L., & Gamberini, A. (2010). Roman window glass: a comparison of findings from three different Italian sites. <i>Archaeometry</i>, 52(2), 252-271.</p> | <p>Balvanović, R., Šmit, Ž., Stojanović, M. M., Spasić-Đurić, D., Špehar, P., & Milović, O. (2022). Late Roman glass from Viminacium and Egeta (Serbia): glass-trading patterns on Iron Gates Danubian Limes. <i>Archaeological and Anthropological Sciences</i>, 14(4), 79.</p> | <p>Wedepohl, K. H., & Simon, K. (2010). The chemical composition of medieval wood ash glass from Central Europe. <i>Geochemistry</i>, 70(1), 89-97.</p> <p>250kg de hêtre par kg de verre</p> | |

Verres silico-sodo-calciques

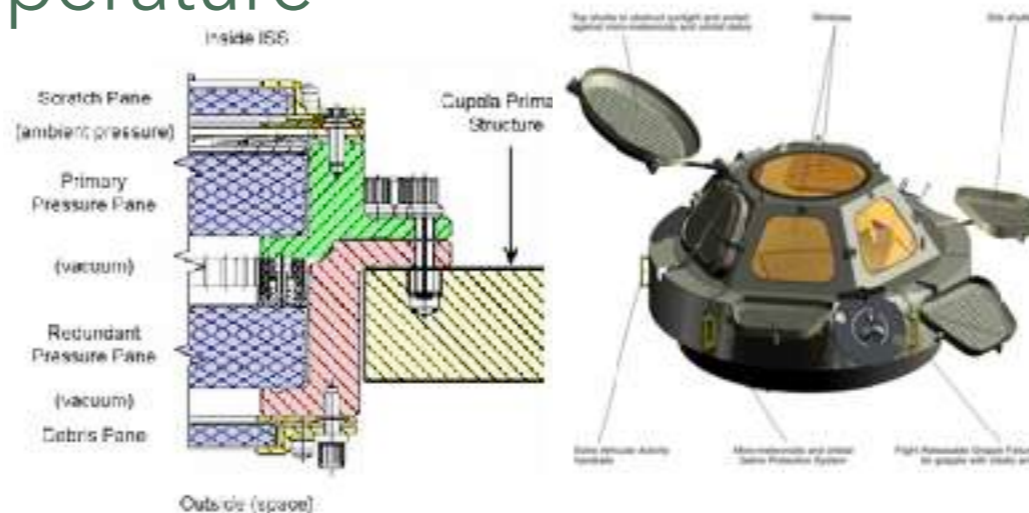
Changer la recette

- Dureté
- Résistance à l'initiation de fissure
- Résistance à la propagation de fissure =



Silice: se dilate 15 fois moins que le verre à vitre
 Résiste à plus haute température
 Plus durable

Se travaille à T > 1600°C



Changer la recette

● Saphir synthétique

Ce n'est pas un verre!

2.5 fois plus dur que la silice, 10 fois plus résistant!

Très résistant aux chocs thermiques



C.P. KH



Production à $T > 2000^{\circ}\text{C}$, $> 5x$ plus cher que la silice

Blindage de véhicule, optiques de missiles, verre de montre

Serait 10x plus cher pour un écran de smartphone

Mais: Objectif de caméra de smartphone

● PMMA et polycarbonate

Transparents, résistants aux chocs, légers!

Faible température d'usage

Corrosion aisée

Peu dur (30 fois moins que le verre)

Jaunit



Changer la recette

● Projet SPINELLE: SOLCERA/Nexter, Airbus Helicopters/DGA



2020: *céramique nanostructurée* ($MgAl_2O_4$)

- 3 x plus tenace que les verres
- 2 x plus dur que la silice
- 30% moins cher que le Saphir, émet moins de CO₂

Taille maximum 150 x 150 x 20 mm³, 300 x 300 x 7 mm³

Changer la recette

● Borosilicate (« Pyrex »): ajout de bore

| | |
|--------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 81% |
| Na ₂ O | 4.0% |
| K ₂ O | 0.5% |
| B ₂ O ₃ | 13.0% |
| Al ₂ O ₃ | 2.0% |

Se dilate 3 fois moins que le verre à vitre
6 fois plus que la silice

Et le coût aussi est entre les deux

Autres propriétés entre le verre à vitre et la silice



● Vitrocéramique (« LAS »):

Ne se dilate quasiment pas du tout

Mise en forme par usinage, moulage

Résistance mécanique proche du verre à vitre

Zerodur:

SiO₂: 57.3 % (-)

Na₂O: 0.2% (- -)

P₂O₅: 6.5% (++)

Al₂O₃: 25.3% (++)

MgO: 1%

TiO₂: 2.5% (++)

Li₂O: 3.4% (++)

ZrO₂: 1.8% (++)



Changer la recette

● On ne fera pas mieux?

Le verre à vitre actuel est un optimum, compromis de coût, de disponibilité de matière première, de mise en forme...

Ré-adapter les fours? Les process? Les outils (découpe, polissage)?

vont
mal
ensemble

- Dureté +transparent!
- Résistance à l'initiation de fissure

→ **Aluminosilicate, Aluminoborate** 

Température de travail!

● Résistance à la propagation de fissure

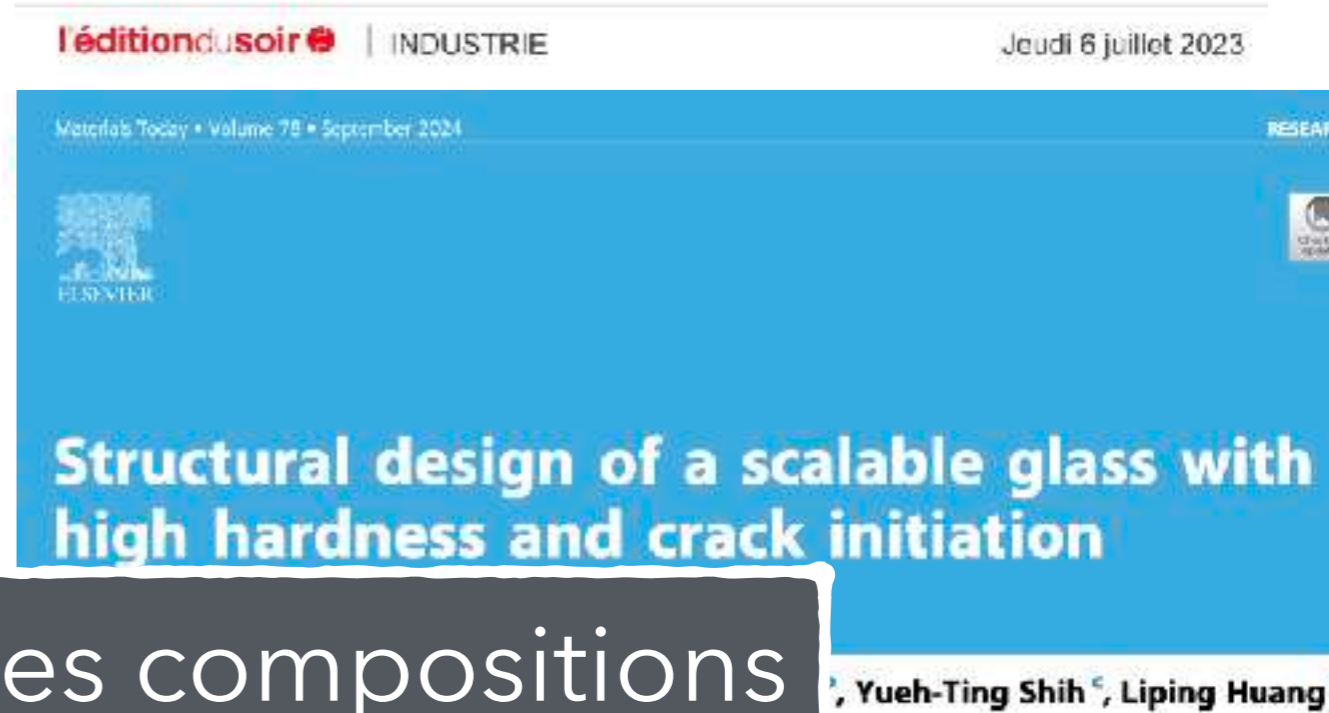
→ **Verres métalliques** 

Transparence!

Changer la recette

● On ne fera pas mieux?

C'est un verre de phosphate
Température de synthèse: 400°C
Pas de carbonate!



~~● Dureté~~
~~● Résista~~
~~● Résista~~

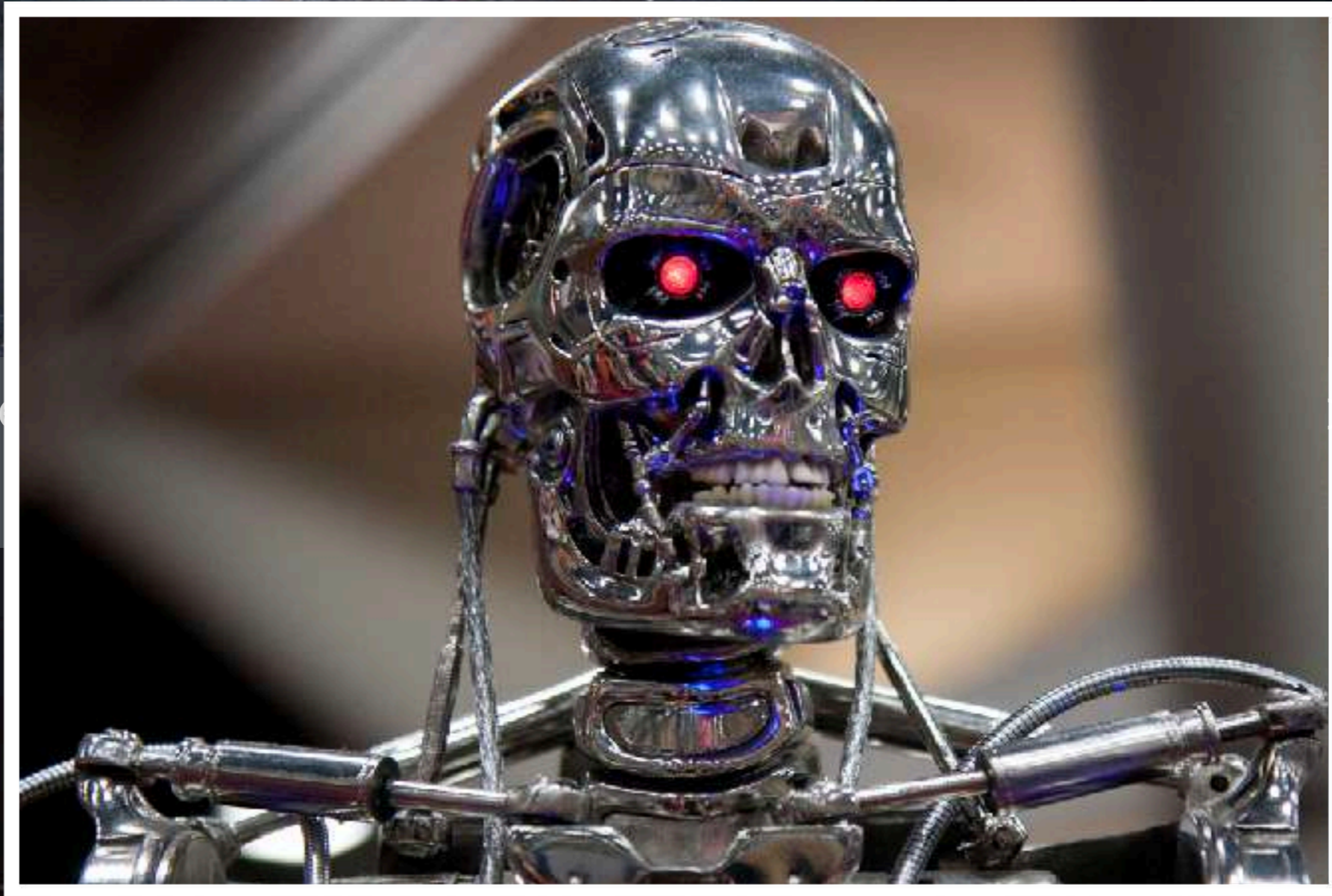
Comment trouver des compositions auxquelles on n'a jamais pensé?

X 10 (par rapport au verre à vitre, X 3 par rapport à la silice), avec un Vickers
1.5 fois moins dur que la silice, autant que le verre à vitre
Un peu plus dense que le verre à vitre

Phosphate... Corrosion?

Changer la recette

100 millions de fois la masse de la voie lactée



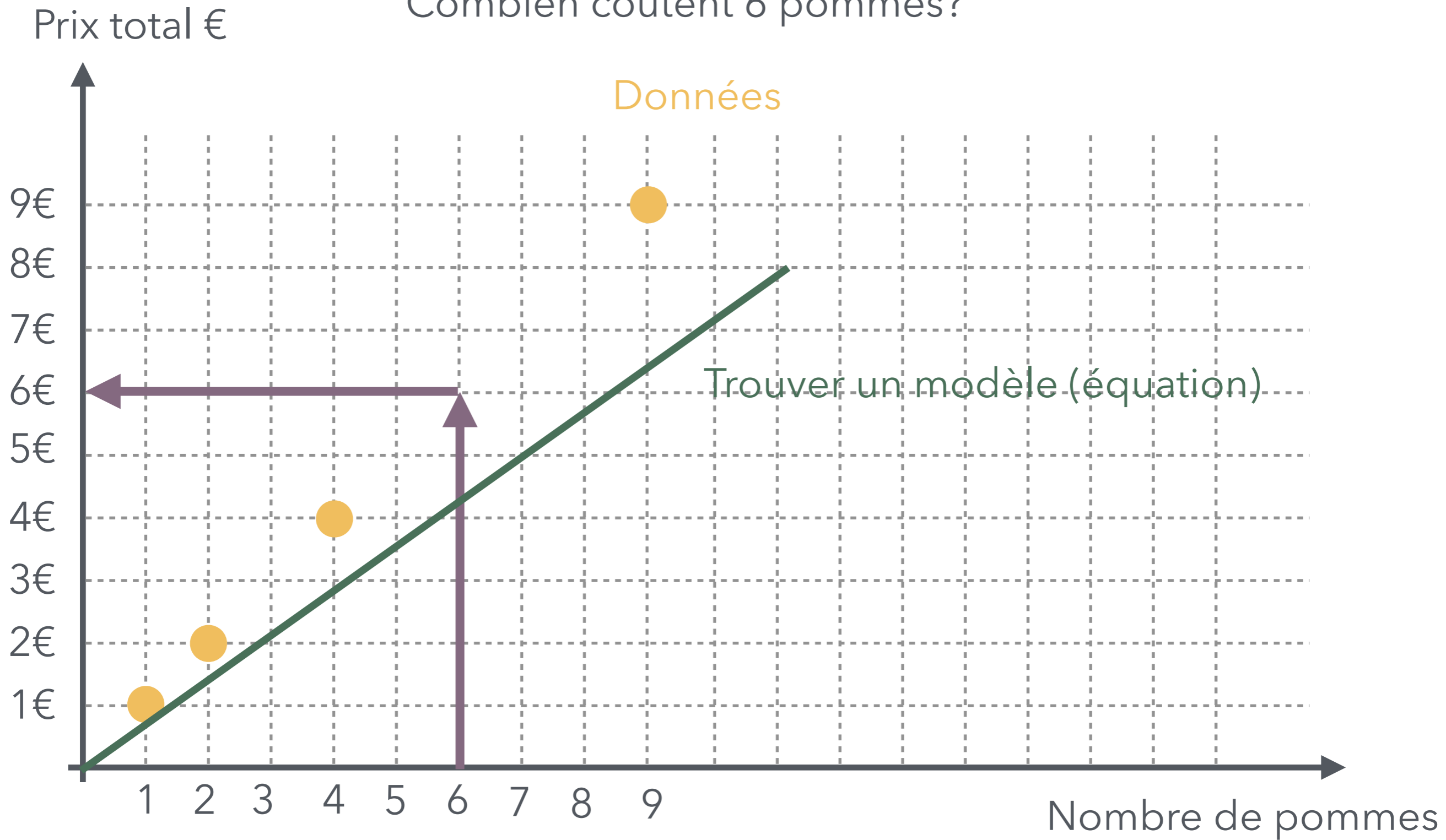
La voie lactée

pour produire

300 milliards d'étoiles, 120 000 années lumière de diamètre.

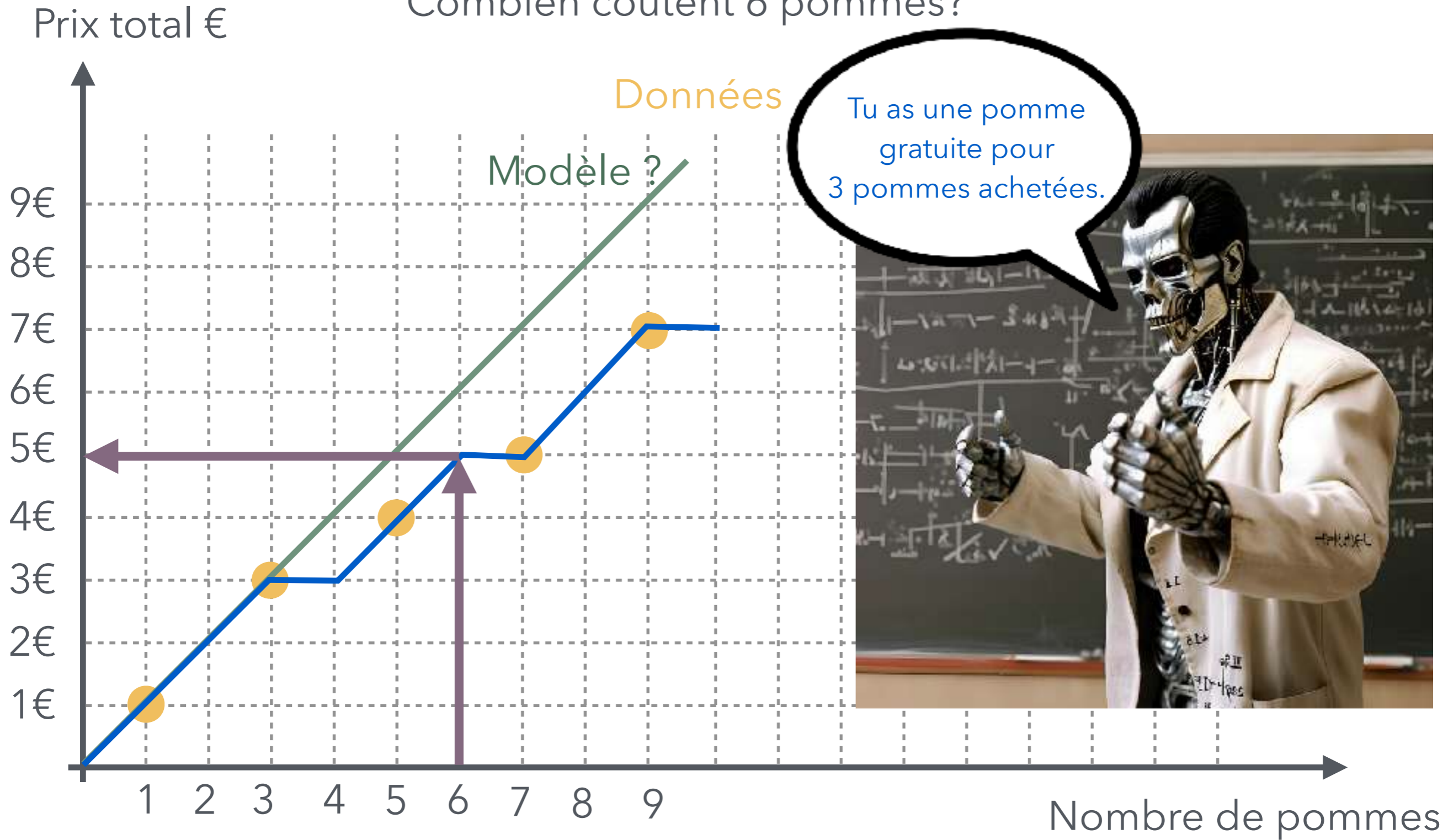
« Intelligence Artificielle »

Combien coutent 6 pommes?



« Intelligence Artificielle »

Combien coutent 6 pommes?



« Intelligence Artificielle »

Glass components (wt%) Blend

| | |
|---------------------------------|-------|
| Al ₂ O ₃ | 5 |
| B ₂ O ₃ | |
| BaSO ₄ | |
| CaO | |
| CaSO ₄ | |
| Cr ₂ O ₃ | |
| Cs ₂ O | |
| CuO | |
| Fe ₂ O ₃ | |
| K ₂ O | |
| Li ₂ O | |
| MgO | |
| MnO | |
| Na ₂ SO ₄ | |
| NaCl | 0-19 |
| NiO | |
| SiO ₂ | |
| ThO ₂ | |
| TiO ₂ | 0-89 |
| U ₃ O ₈ | 2-12 |
| PuO ₂ | 0-020 |
| SrO | 0-043 |
| TcO ₂ | 0-013 |
| ZnO | 0-075 |

Compositions déjà étudiées

Apprentissage



Propriétés déjà mesurées



-Large influence de la qualité des bases de données
-Contraintes? Compromis?

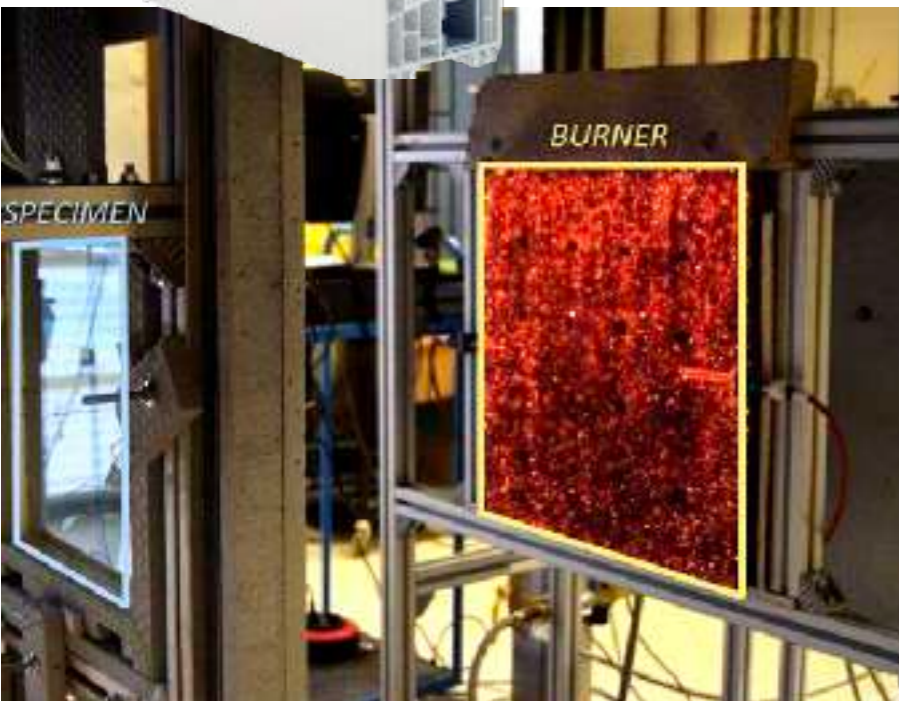
la fissuration de mise en forme



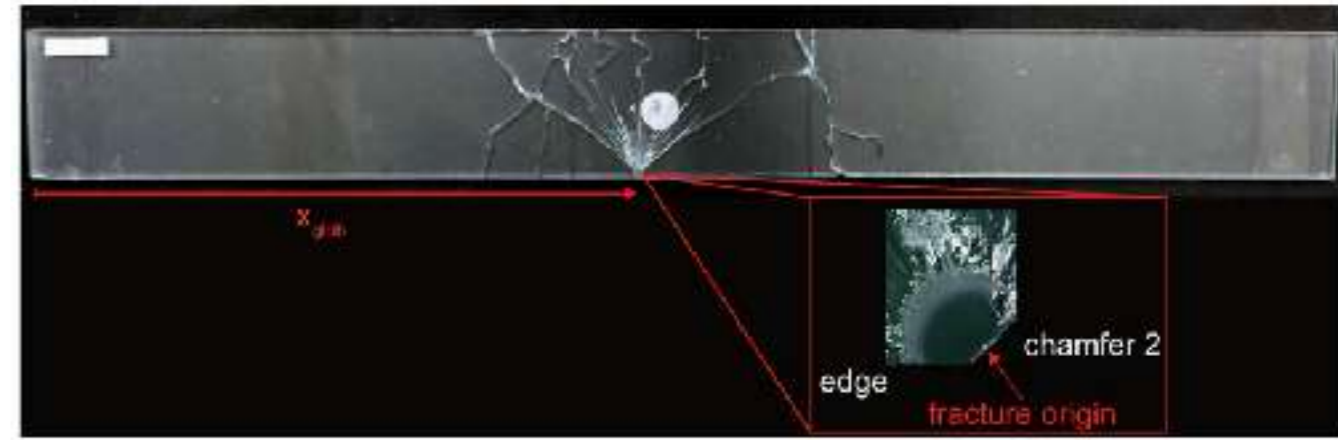
Quel serait le meilleur verre?

En gardant la même composition

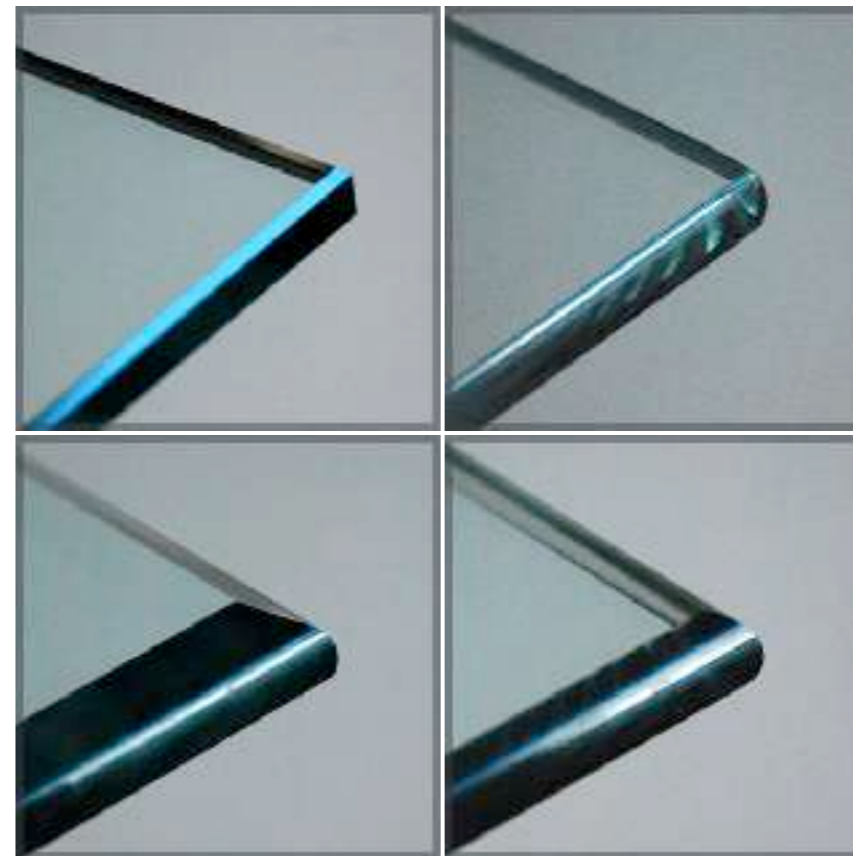
Préparation des bords



Jørgensen, J. D., Nielsen, J. H., & Giuliani, L. (2022).
Safety Science, 149, 105683.



Bukieda, P., Lohr, K., Meiberg, J., & Weller, B. (2020).
Glass Structures & Engineering, 5, 411-428.



<https://newanglebeveling.com>

**Coupé à la main
vs
Coupé à la machine
+chanfrein
+polissage auto.:**

**Résistance: x2
Écart type: /4**

Veer, F. A., & Zuidema, J.
(2003, June).
The strength of glass, effect
of edge quality.
In *Proceedings GPD 2003
conference, Tampere*.

En gardant la même composition

Verre feuilleté

Invention: Edouard Benedictus (1903)

« Il réfléchissait à deux accidents de voiture dans lesquels des personnes avaient été horriblement blessées par des éclats de verre, et il s'est souvenu d'une fiole en verre qu'il avait fait tomber un jour au laboratoire. Elle était recouverte d'une pellicule de solution de nitrate de cellulose évaporée, s'était fissurée, mais les particules de verre étaient restées attachées à la pellicule sèche à l'intérieur. »



Triplex (1912): sandwich verre-cellulose-verre



Bobine de film en nitrate de cellulose

« Le pare-brise Triplex m'a sauvé la vie »
19/02/1919



© Phot. F. Lauginie / DR / Archives de Saint-Gobain

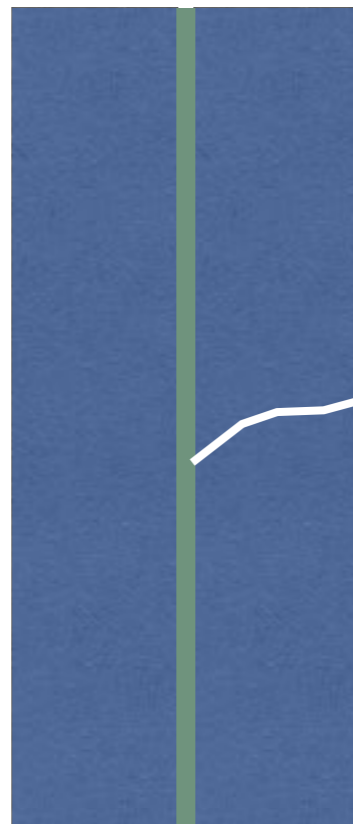
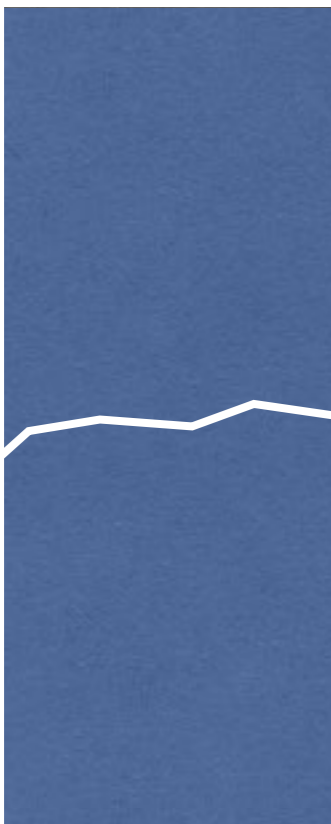


En gardant la même composition

Verre feuilleté



Poly-(butyral vinylique) →



En gardant la même composition

Verre feuilleté



LITE-FLOOR XTRA GRIP

Multicouches, ép. 32 mm, 0.5 tonne/m²

Et demain?

Aujourd'hui, les améliorations sont surtout faites sur les polymères intercalaires...
(notamment performance phonique)



- Pare-balle
- Anti-effraction



En gardant la même composition

Verre trempé (thermique)

- Goutte de Rupert (connu depuis au moins 1625 ap. JC, connu des romains?)
- François Royer de la Bastie (brevet, 1874, trempe dans l'huile et la graisse)
- Saint-Gobain (1929, application pour verre plat)

Le verre est chauffé
entre 650 et 700°C

Puis refroidit
sous jets d'air

10 min plus tard



visqueux, mais pas trop



le coeur reste visqueux



le coeur se contracte

La compression de la surface:

- Gêne l'apparition de fissure
- Gêne la propagation de fissure

Quand une fissure arrive au coeur, elle rentre
dans une zone de tension:

Résistance x 2.5 à x 5



En gardant la même composition



Vitrages latéraux/arrière des voitures



Vitrages des trains



En gardant la même composition

Géométries simples



Inapplicables à d'autres verres

- Silice
- Borosilicate

Depuis 2020:



Bouteille Echovai

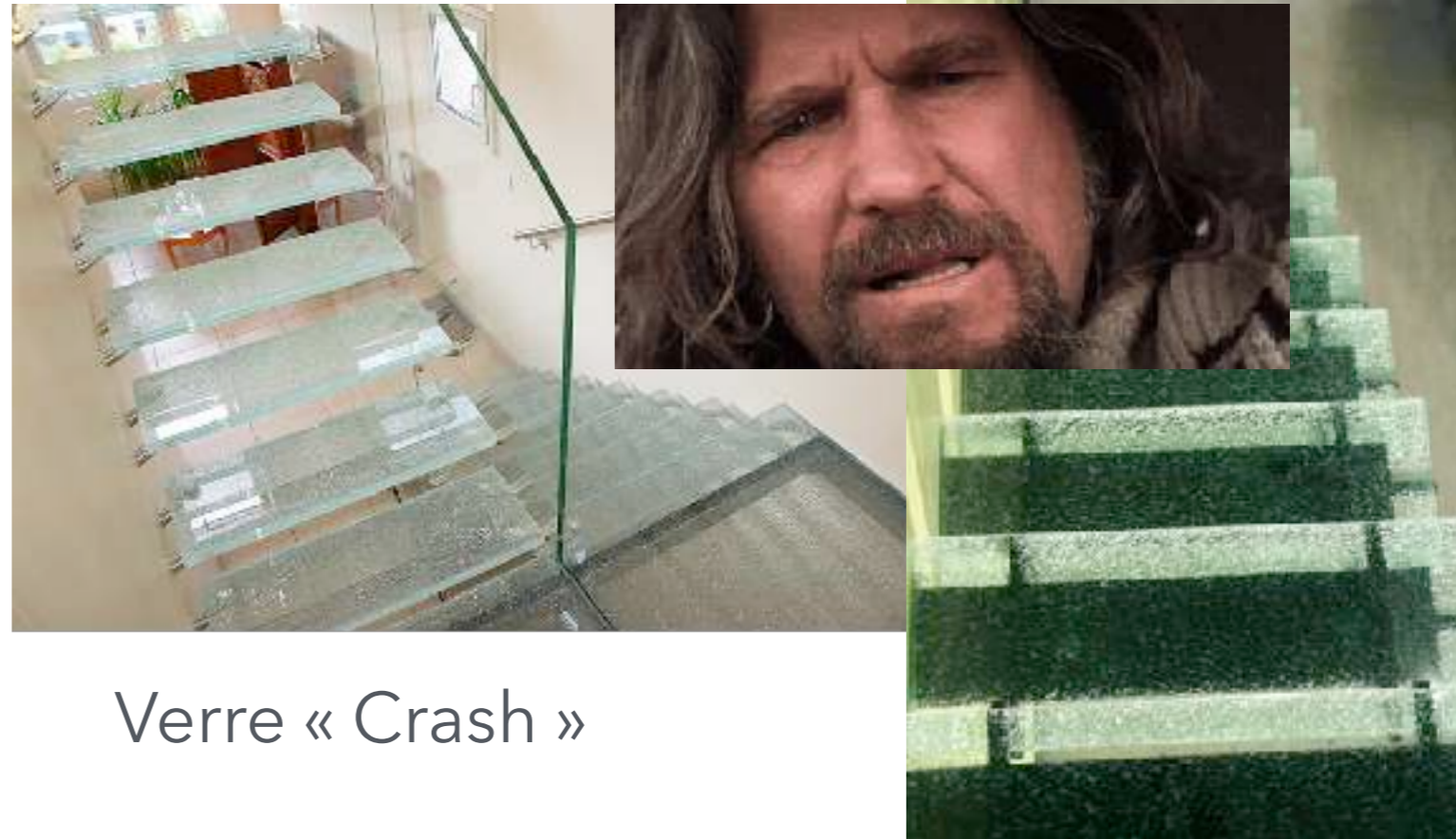
« Grosses » épaisseurs



- 30% plus légère
- Consignable
- 33cl?

En gardant la même composition

Verre feuilleté-trempé



Trempé: résistant aux chocs/chocs thermiques

Feuilleté: effraction/blindage/pas de chute de morceaux

Exposé aux chocs, devant garder son intégrité

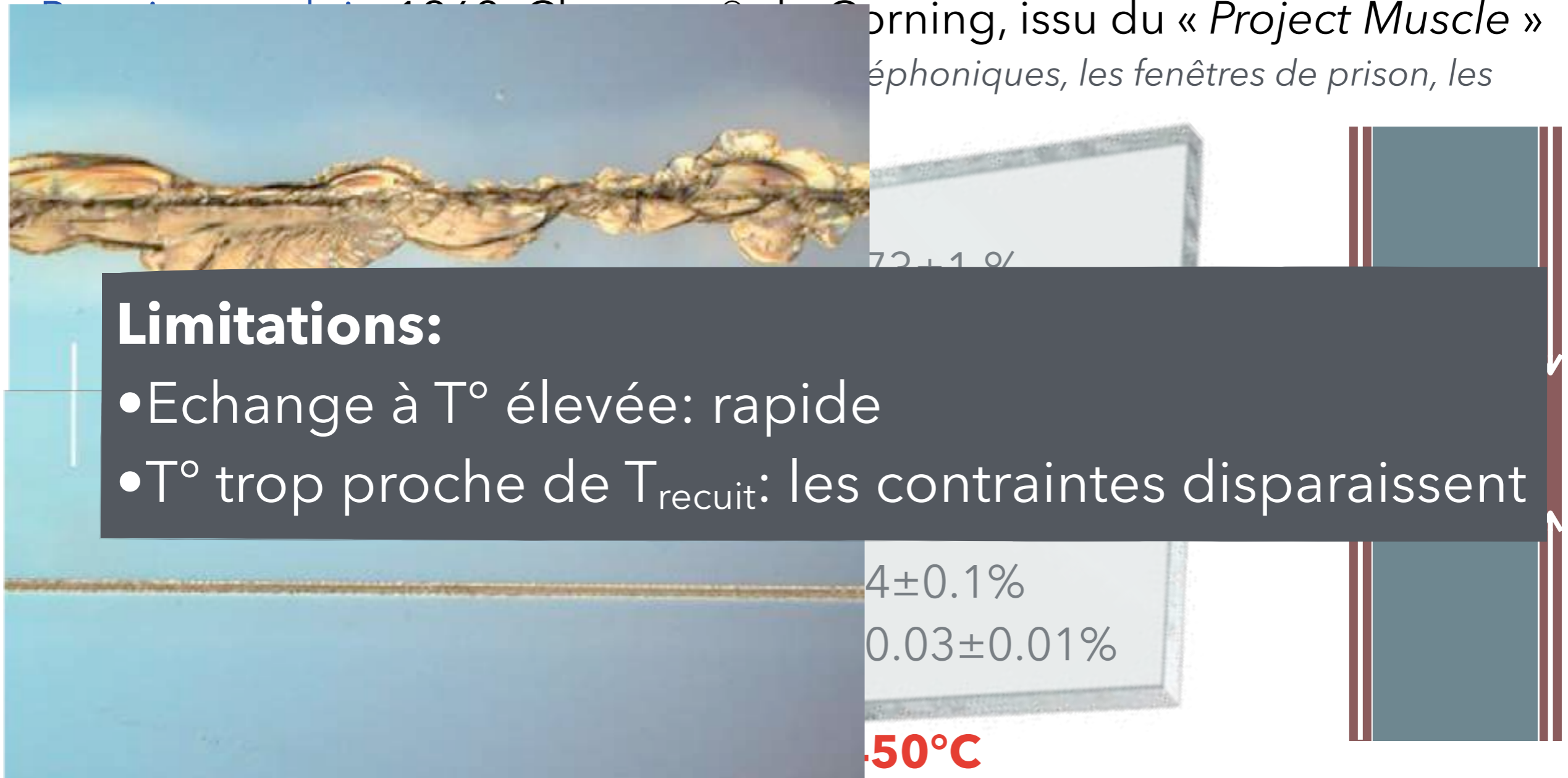
En changeant un peu la composition

Verre trempé chimiquement

Invention (1960-1961):

Steven Kistler ; Paul Henri Acloque / Jean Paul Tochon (Saint-Gobain)

... 1960, Corning, issu du « *Project Muscle* »
... phoniques, les fenêtres de prison, les

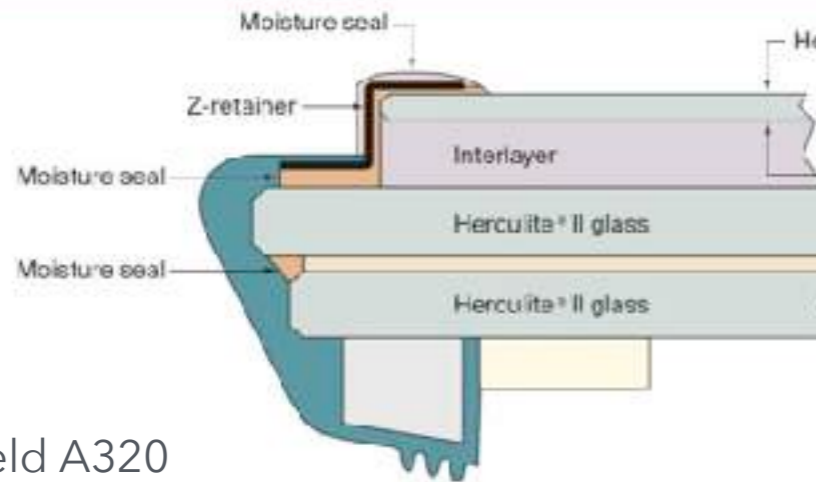


En changeant un peu la composition

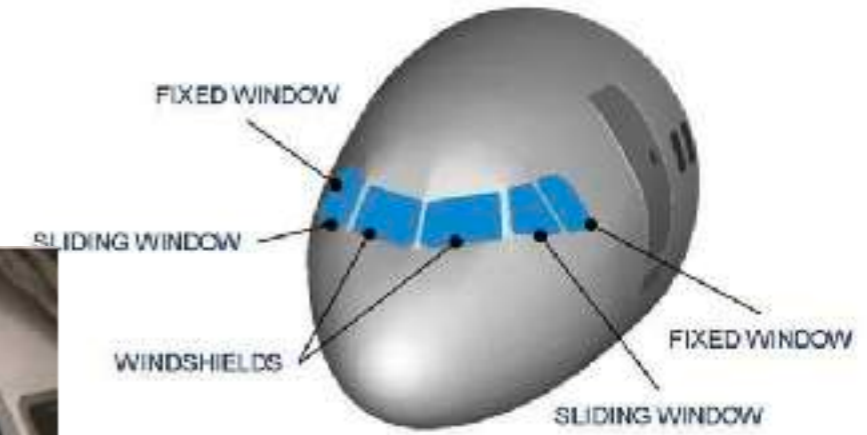
Verre trempé chimiquement

Pare-brise avion/hélicoptère

www.saint-gobain-sully.com



Windshield A320



Herculite II: trempé chimique



Modification de la composition chimique du verre:

Dont ajout de bore

- Augmenter la dureté
- Augmenter la résistance à l'initiation/propagation de fissure même sans échange chimique
- Optimiser l'échange (contrainte de compression, profondeur de pénétration)

En changeant un peu la composition

Verre trempé chimiquement

Plus dur (- que la silice), initiation et propagation de fissure plus difficile

Résistance: x 15 à x 20

Géométries complexes

Pas de distorsion optique

Faibles épaisseurs



Cher... car long: jusqu'à 1 jour

ReViSalt GmbH (2022): qq dizaines de min ?



Verre anti-effraction, pare-balle,
mais cher...

Les fibres pour composites

Hermann Hammesfahr (1880): brevet, tissu de verre

Pour produire des abat-jours... (exposition universelle de 1893 à Chicago)

1933: découverte accidentelle d'un procédé « spray » (Owens),
production de filtre à air

1938: Corning s'y intéresse... Owens-Corning, puis deuxième guerre mondiale



Rigidité des fibres



Légèreté
Résistance au choc
du polymère



Les fibres pour composites

Critères pour les fibres

- Facile à fibrer
- Apporte de la rigidité
- Le plus léger possible
- Plus durable/polyvalente?
- Moins cher?

A masse égale, la fibre de carbone est:

- 4 fois plus rigide que la fibre de verre
- 8 fois plus chère
- Moins résistante aux acides et solvants

Meilleur candidat?



Hagnell, M. K., & Åkermo, M. (2019). The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. *Journal of cleaner production*, 223, 957-968.

Les fibres pour composites

Recyclage

Faisable pour le carbone:

- Pyrolyse
- Peu de perte de propriétés
- Découpe en morceaux =
Perte de longueur

Fibre de verre:



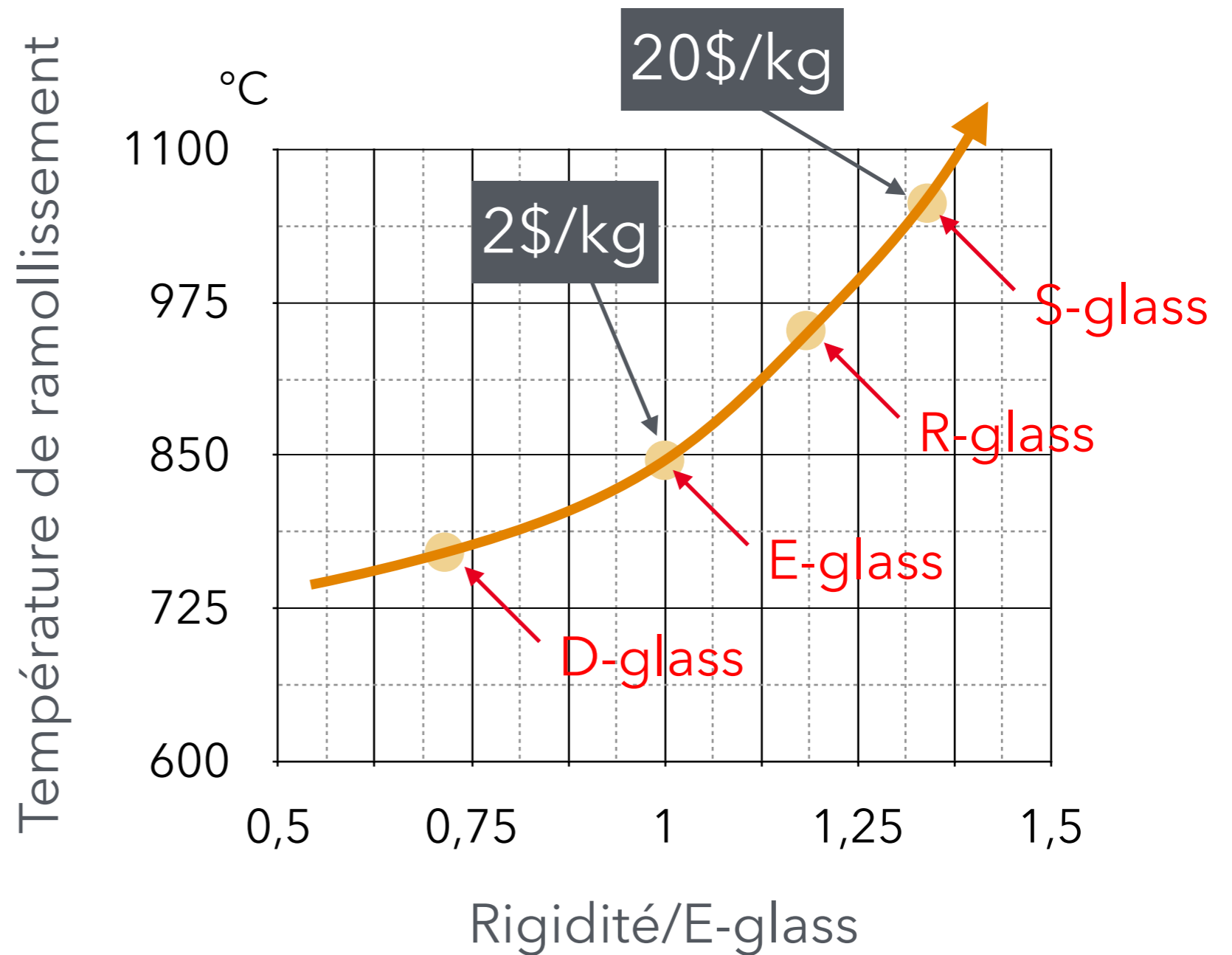
Jusqu'à 50% de perte après pyrolyse

Une course à la rigidité/résistance des fibres, sans augmenter le prix

- **E-glass:** SiO_2 :54% ; Al_2O_3 :15% ; MgO :2% ; CaO :22% ; B_2O_3 :8% (fibre dominante)
- **R-glass:** SiO_2 :58% ; Al_2O_3 :25% ; MgO :6% ; CaO :12% ; B_2O_3 :<1% (haute rigidité, éolienne)
- **S-glass:** SiO_2 :65% ; Al_2O_3 :25% ; MgO :10% ; CaO :<1% ; B_2O_3 :<1% ; (aérospatial)
+23% rigidité +35% résistance ; prix: x 8...

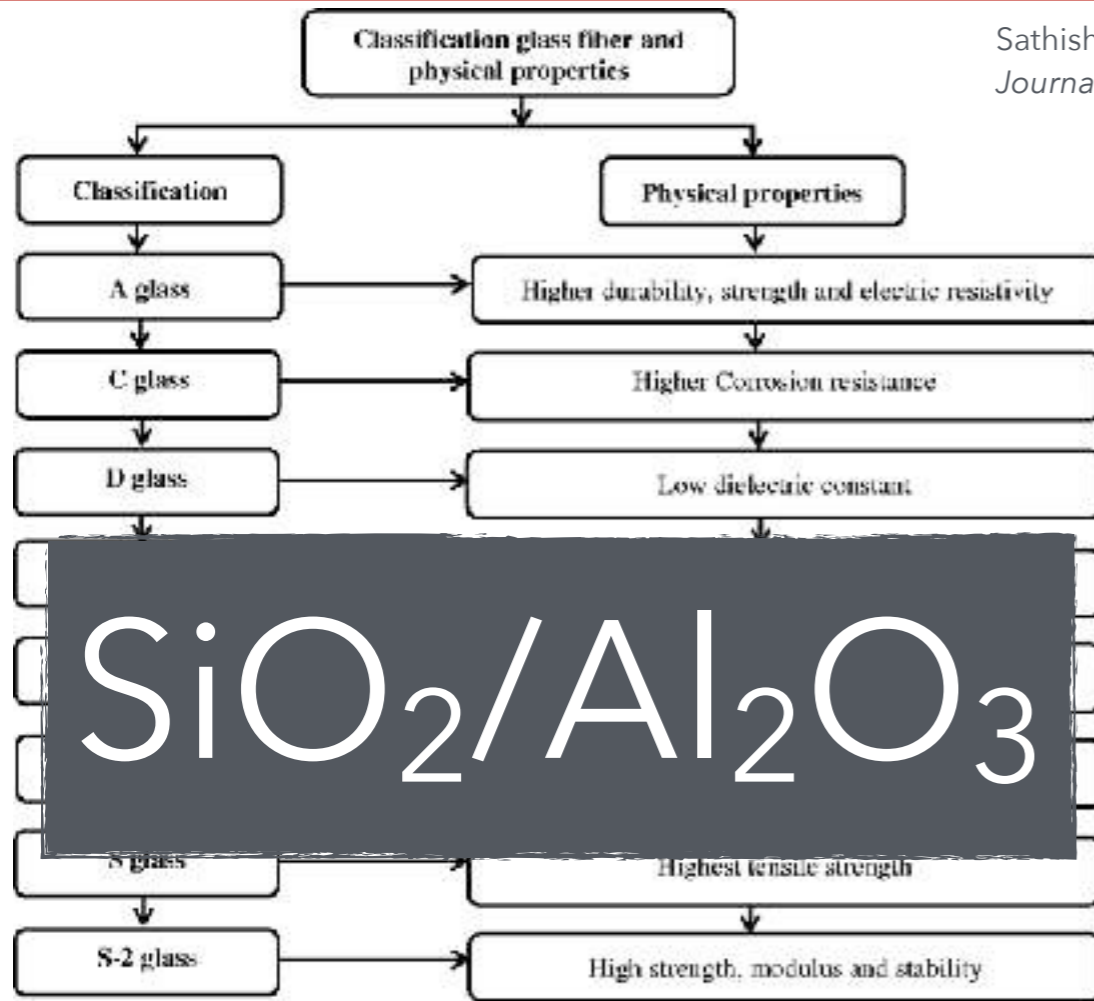
Les fibres pour composites

Une course à la rigidité/résistance des fibres, sans augmenter le prix



Les fibres pour composites

Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites-a review. *Journal of reinforced plastics and composites*, 33(13), 1258-1275.



| Type | (SiO ₂) | (Al ₂ O ₃) | TiO ₂ | B ₂ O ₃ | (CaO) | (MgO) | Na ₂ O | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ |
|-----------|---------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|--------------------------------|
| E-glass | 55.0 | 14.0 | 0.2 | 7.0 | 22.0 | 1.0 | 0.5 | 0.3 | - |
| C-glass | 64.6 | 4.1 | - | 5.0 | 13.4 | 3.3 | 9.6 | 0.5 | - |
| S-glass | 65.0 | 25.0 | - | - | - | 10.0 | - | - | - |
| A-glass | 67.5 | 3.5 | - | 1.5 | 5.5 | 4.5 | 13.5 | 3.0 | - |
| D-glass | 74.0 | - | - | 22.5 | - | - | 1.5 | 2.0 | - |
| R-glass | 60.0 | 24.0 | - | - | 9.0 | 6.0 | 0.5 | 0.1 | - |
| EGR-glass | 61.0 | 13.0 | - | - | 22.0 | 3.0 | - | 0.5 | - |
| Basalt | 52.0 | 17.2 | 1.0 | - | 8.6 | 5.2 | 5.0 | 1.0 | 5.0 |

SiO₂ haute température de production, rigidité limitée

Al₂O₃ augmente la rigidité et la température de synthèse

MgO/CaO un jeu pour piloter la température de synthèse sans trop perdre les propriétés mécaniques (« effet mixte alcalino-terreux »)

B₂O₃ : résistance électrique (E) ; perméabilité aux ondes électromagnétique (D)

Ajout d'éléments plus exotiques: BeO augmente fortement la rigidité

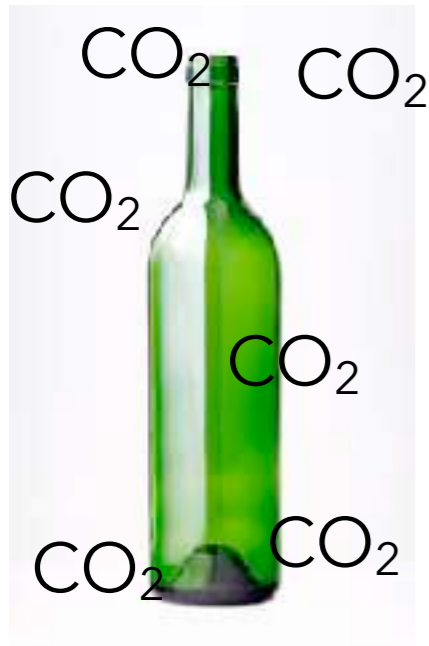


Conclusion



Conclusion

Un verre plus résistant = un verre plus écologique?

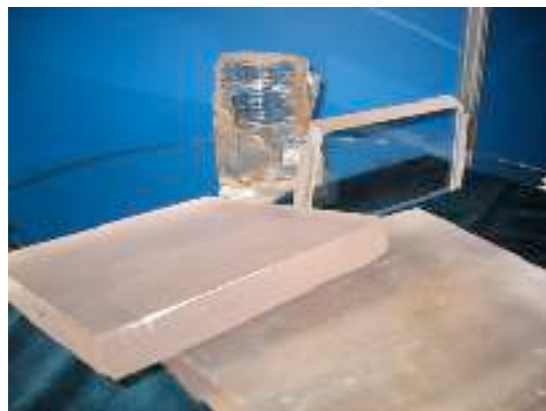


Trempée thermique

Trempée chimique

= **plus léger**

- Moins de CO₂ au transport
- Idéal si ré-emploi



Saphir: forte consommation de CO₂ à la fabrication, mais quasi-éternelle

Des verres plus performants sans augmentation de CO₂ et de coût?

Conclusion

Vitre dans les bâtiments



Vitrages en place depuis 55 ans

Durable, peu onéreux, assez résistant...

Peu de contraintes pour le faire évoluer

Calcin utilisable à 100%

Les verres feuilletés/trempés conviennent

ArmiGlass

Trempé-feuilleté: 130-290€/m²

Trempé chimique: 190-550€/m²

Vitre dans les transports



Verre des emballages

Plus léger = plus résistant et plus fins

La pression
écologique/économique
est-elle suffisante?

Nouveaux verres...

Recyclage? Ré-emploi?

Conclusion

| SiO_2 % en masse | Na_2O % en masse | CaO % en masse | K_2O % en masse | MgO % en masse | Al_2O_3 % en masse | Fe_2O_3 % en masse | TiO_2 % en masse | Sb_2O_5 % en masse | MnO % en masse | CuO % en masse |
|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 70.54 | 15.74 | 8.73 | 0.758 | 0.601 | 2.70 | 0.383 | 0.086 | nd | 0.11 | 0.002 |



The Corning Museum of Glass, Corning, New York.

Verre du site de Jalame (351-383):

$$K_{Ic}: 0.698 \text{ à } 0.734 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

Verre float moderne (>1959):

$$K_{Ic}: 0.728 \text{ à } 0.790 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

+0% en 1580 ans...



John G. Swogger, The Corning Museum of Glass

Quinn, G. D., & Swab, J. J. (2019).

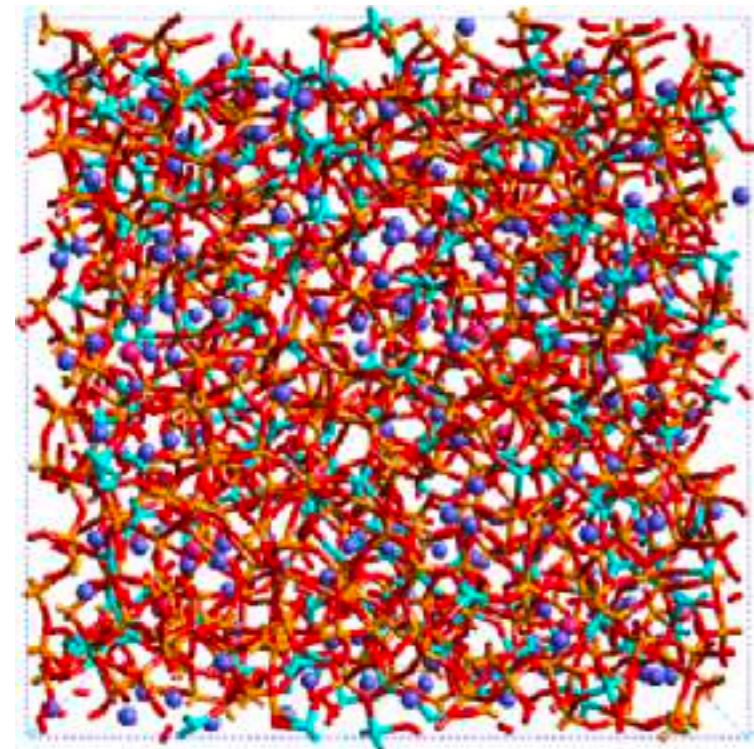
On the Fracture Resistance of Ancient Roman Glass from the Jalame Excavations. *Journal of Glass Studies*, 61, 254-259.

Conclusion

Composition



Structure



Li, H., Charpentier, T., Du, J., Vennam, S., (2017)
International Journal of Applied Glass Science,
8, 23-36



Conclusion

IA, Prompt: « un animal qui ne ressemble à rien de ce qui existe en vrai ou dans la littérature. »



<https://www.freepik.com/pikaso/ai-image-generator>

Une IA ne génère des résultats qu'à partir de ce qu'elle a appris.

Une IA ne proposera que des verres dans les familles apprises.

Une IA n'aurait pas inventé le verre trempé!

Conclusion



?

?

-4000

-3000

-2000

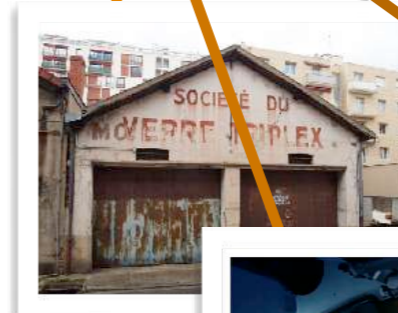
-1000

0

1000

2000

3000



Merci!