

DIDIER ROUX

La saga du Verre

LE VERRE :
UN MATÉRIAU UNIQUE,
DES PROCÉDÉS EXCEPTIONNELS



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



Billes DE sciences

<https://www.youtube.com/watch?v=DtXHZ1BWtNg>



LE VERRE: LA TRANSPARENCE

SAINT GOBAIN GLASS

CAFE

30 SEC

FINAL

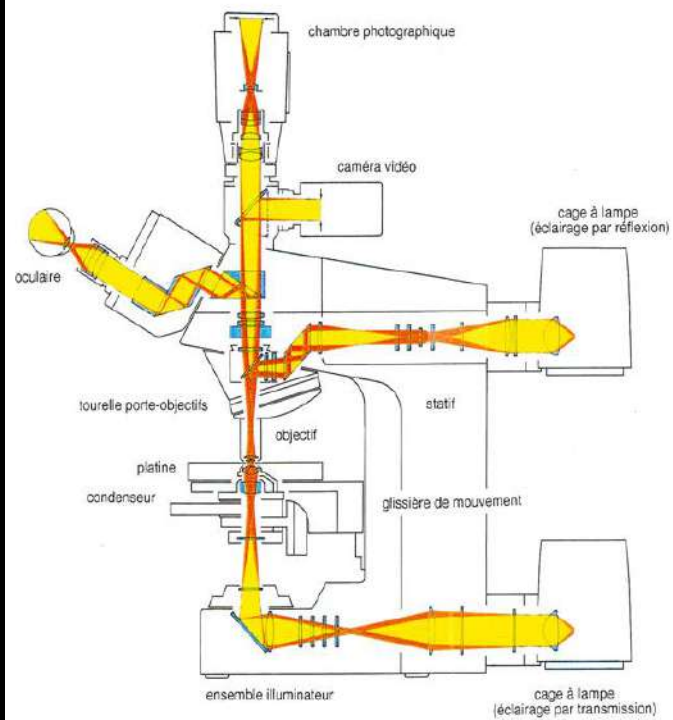
13-3-2001

www.saint-gobain-glass.com/in

VOIR L'INFINIMENT GRAND



VOIR L'INFINIMENT PETIT

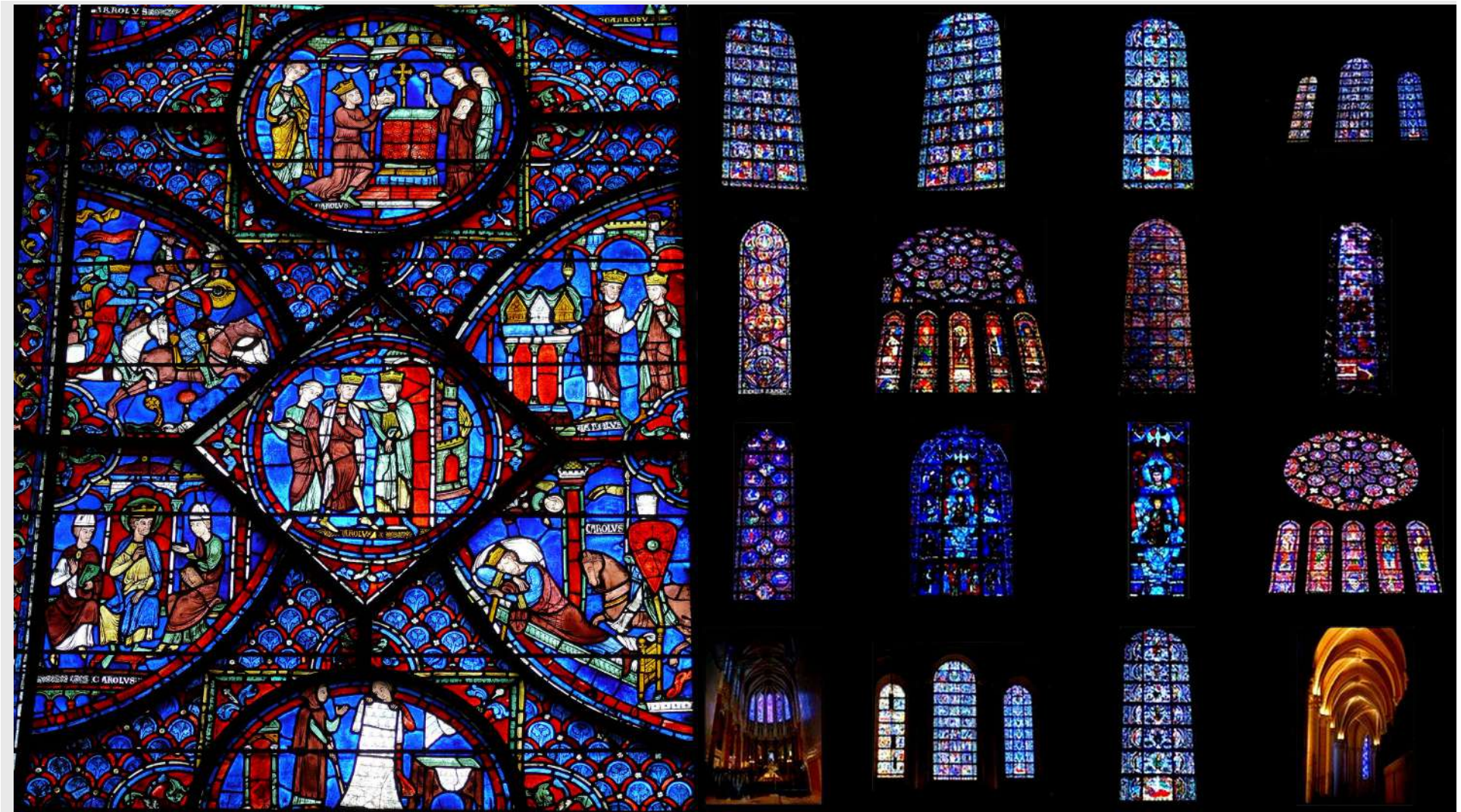


LE VERRE :
UN MATÉRIAU AUX PROPRIÉTÉS
INÉGALABLES

PROPRIÉTÉS DU VERRE : TRANSPARENT



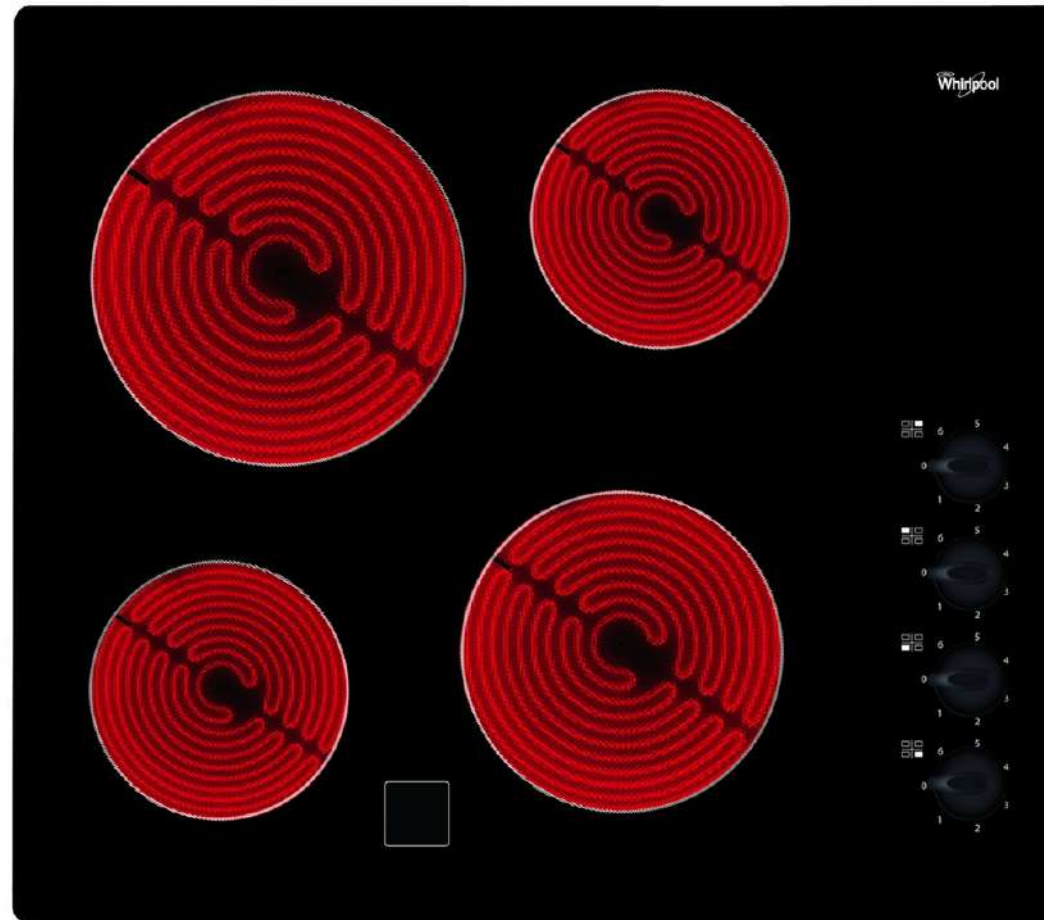
PROPRIÉTÉS DU VERRE : RÉSISTANT AU TEMPS (Chartres XII-XIII^e siècle)



PROPRIÉTÉS DU VERRE : RÉSISTANT AUX PRODUITS CHIMIQUES



PROPRIÉTÉS DU VERRE : RÉSISTANT À LA TEMPÉRATURE



RÉSISTANCE MÉCANIQUE, À L'ÉCHELLE HUMAINE... ET PLUS...



PROPRIÉTÉ DU VERRE : TRÈS DUR... le verre rayé par le diamant



Lapérouse
PARIS
MAISON ROYALE DEPUIS 1700



PROPRIÉTÉS DU VERRE : UN SOLVANT EXCEPTIONNEL

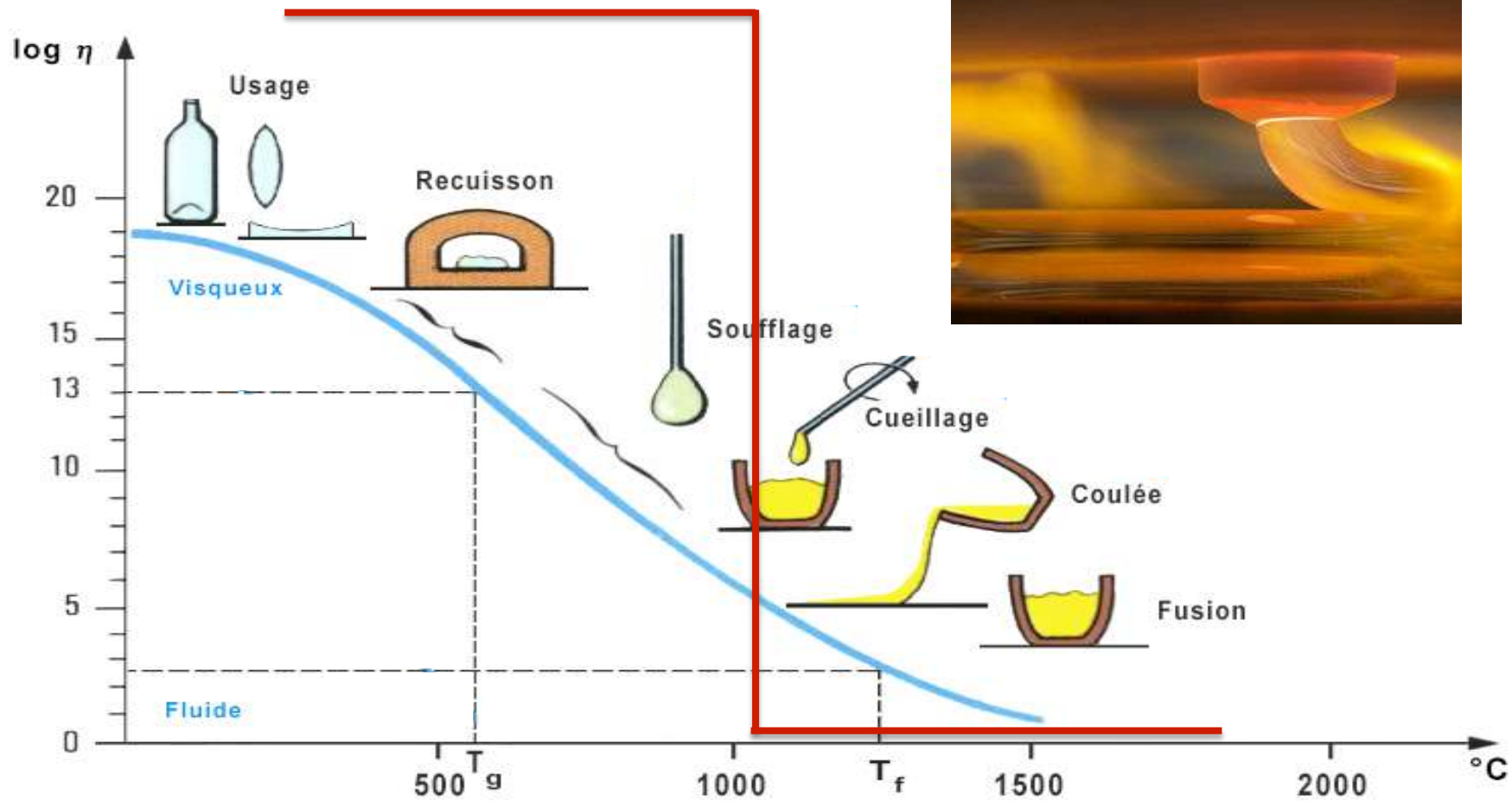
Solvant & conditionnement des déchets radioactifs



SA VISCOSITÉ VARIABLE AVEC LA TEMPÉRATURE :
UN COMPORTEMENT EXCEPTIONNEL

PROPRIÉTÉS DU VERRE : UN MATÉRIAU INFINIMENT MODELABLE

Fonte Un liquide en surfusion et non un solide, et pourtant...



GRANITE, SABLE, QUARTZ, VERRE, UN ÉLÉMENT COMMUN : LA SILICE SiO_2

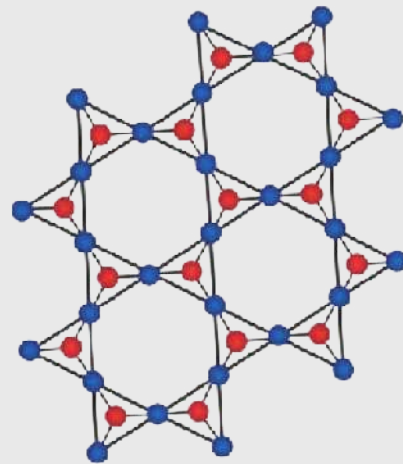
LA SILICE : le matériau le plus abondant sur Terre, chimiquement très stable



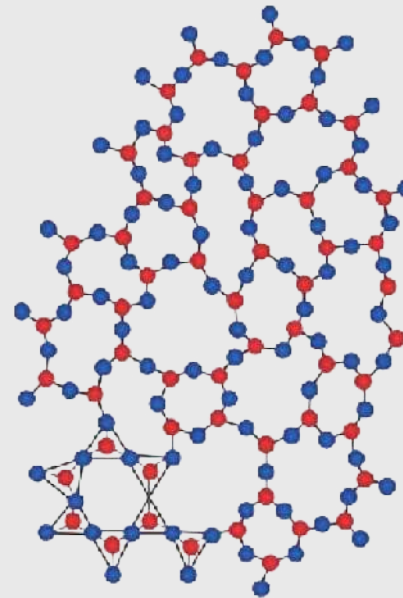
LA SILICE SiO_2 : UNE STRUCTURE UNIQUE

Extrême
robustesse
(liaison **SiO**)

Cristal de SiO_2
(Quartz)



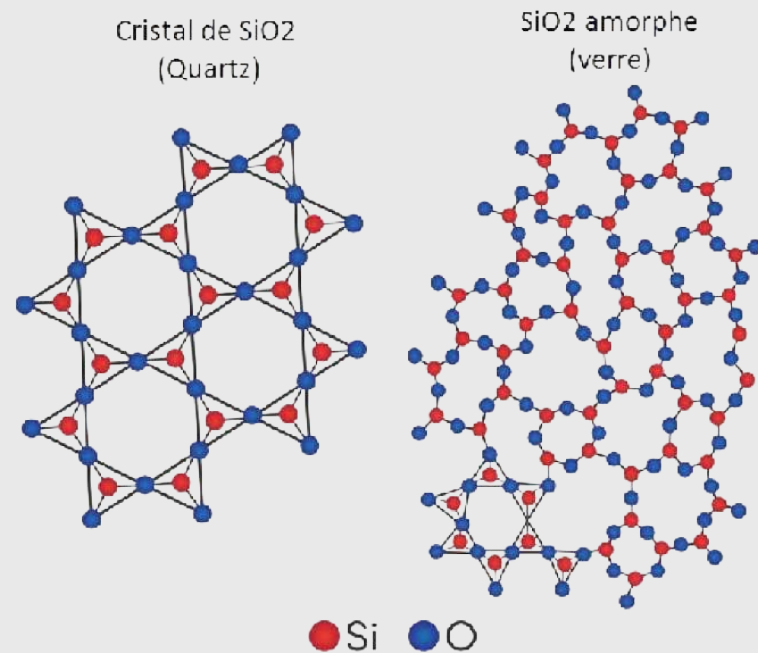
SiO_2 amorphe
(verre)



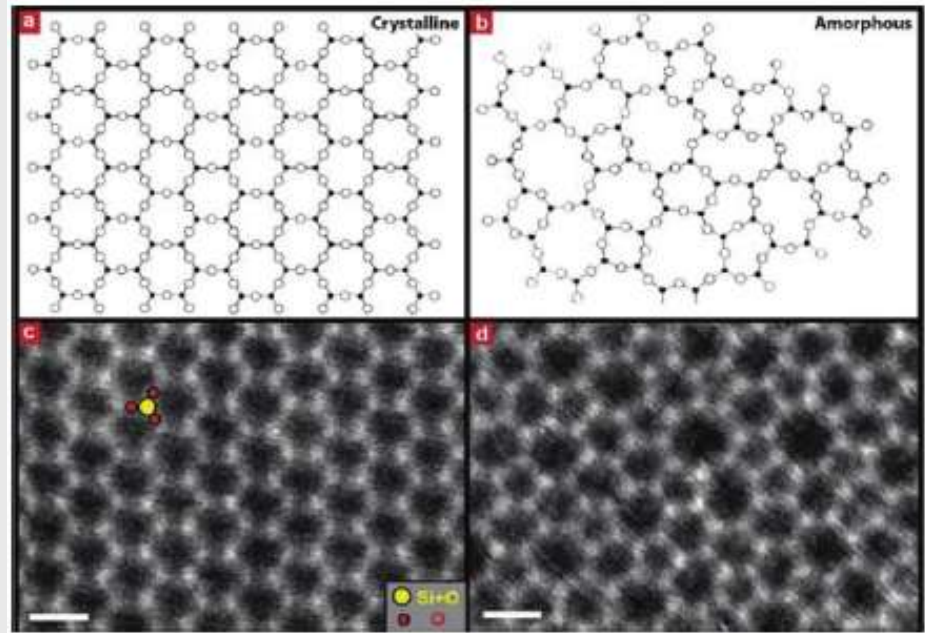
● Si ● O

Formable
et transparent
(structure amorphe)

LA SILICE SiO_2 : UNE STRUCTURE UNIQUE

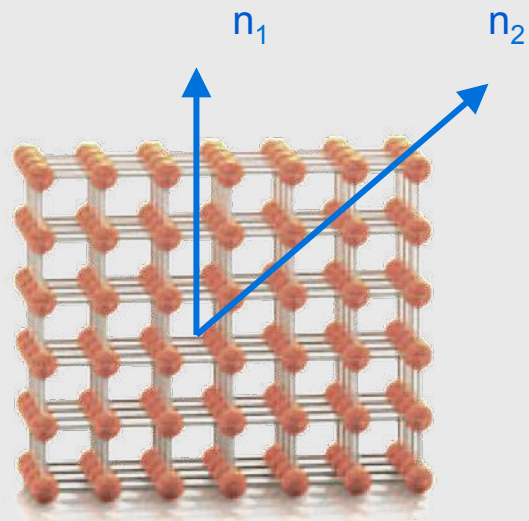


Extrême robustesse (liaison SiO)
Formable et transparent (structure amorphe)

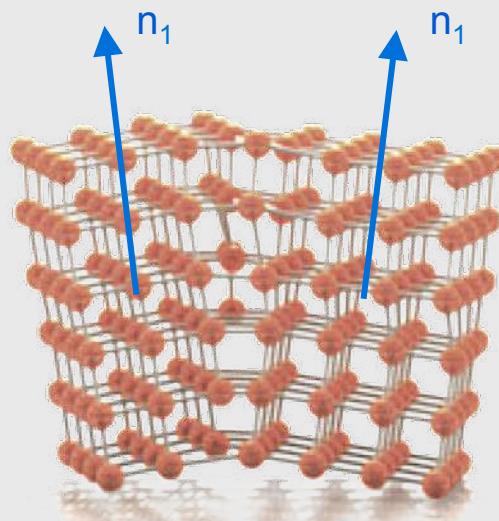


Microscopie électronique

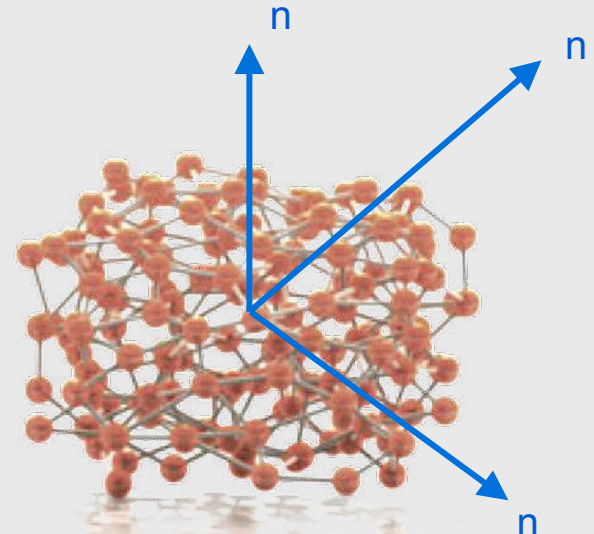
LA TRANSPARENCE



Cristallin



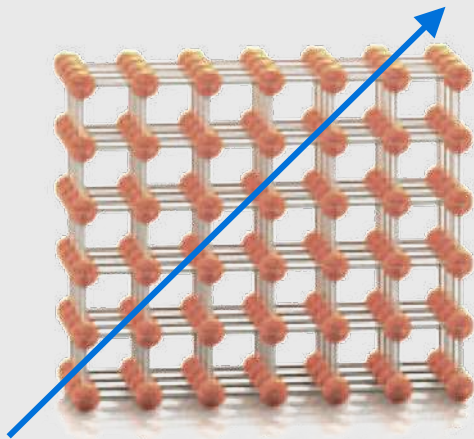
Polycristallin



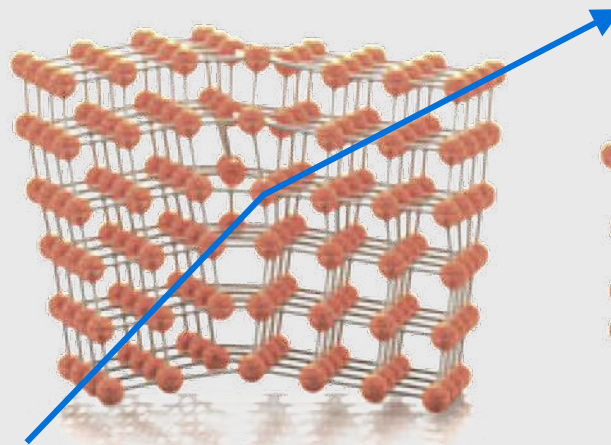
Amorphe



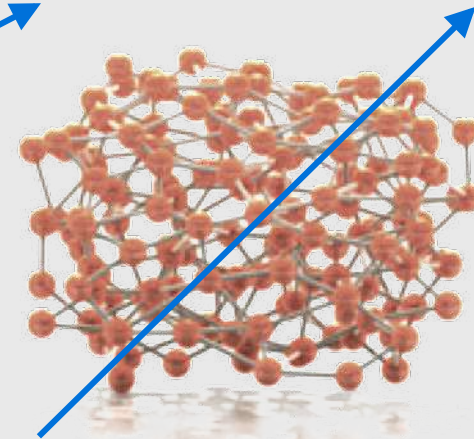
LA TRANSPARENCE



Cristallin



Polycristallin



Amorphe



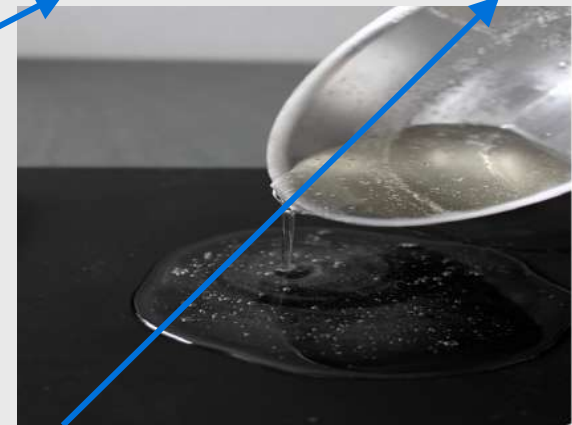
EXEMPLE COURANT : LE SUCRE



Mono-cristallin



Poudre multi-cristalline



Liquide

L'Histoire du verre

Un matériau exceptionnel



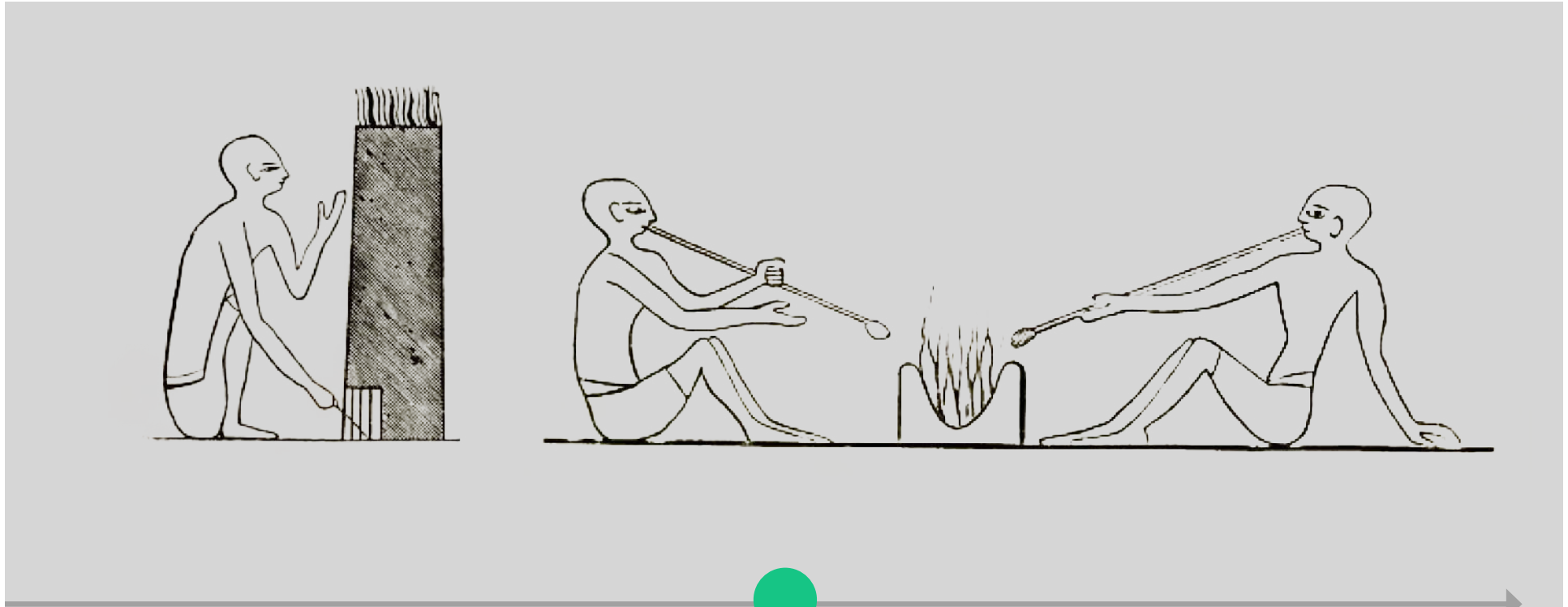
UNE INVENTION INITIALE ...



« On raconte que des marchands phéniciens, ayant relâché sur le littoral du fleuve Belus, préparaient, dispersés sur le rivage, leur repas, et que ne trouvant pas de pierres pour exhausser leurs marmites, ils employèrent à cet effet des pains de natron de leur cargaison. Ce nitre ayant été ainsi soumis à l'action du feu avec le sable répandu sur le littoral du fleuve, **ils virent couler des ruisseaux transparents d'une liqueur inconnue, et telle fut l'origine du verre** »

Pline l'Ancien
livre XXXVII Histoire Naturelle

LA FABRICATION DÉCRITE À THÈBES (ÉGYPTE)



ÉGYPTE ANTIQUE

-2000 av. J.-C.

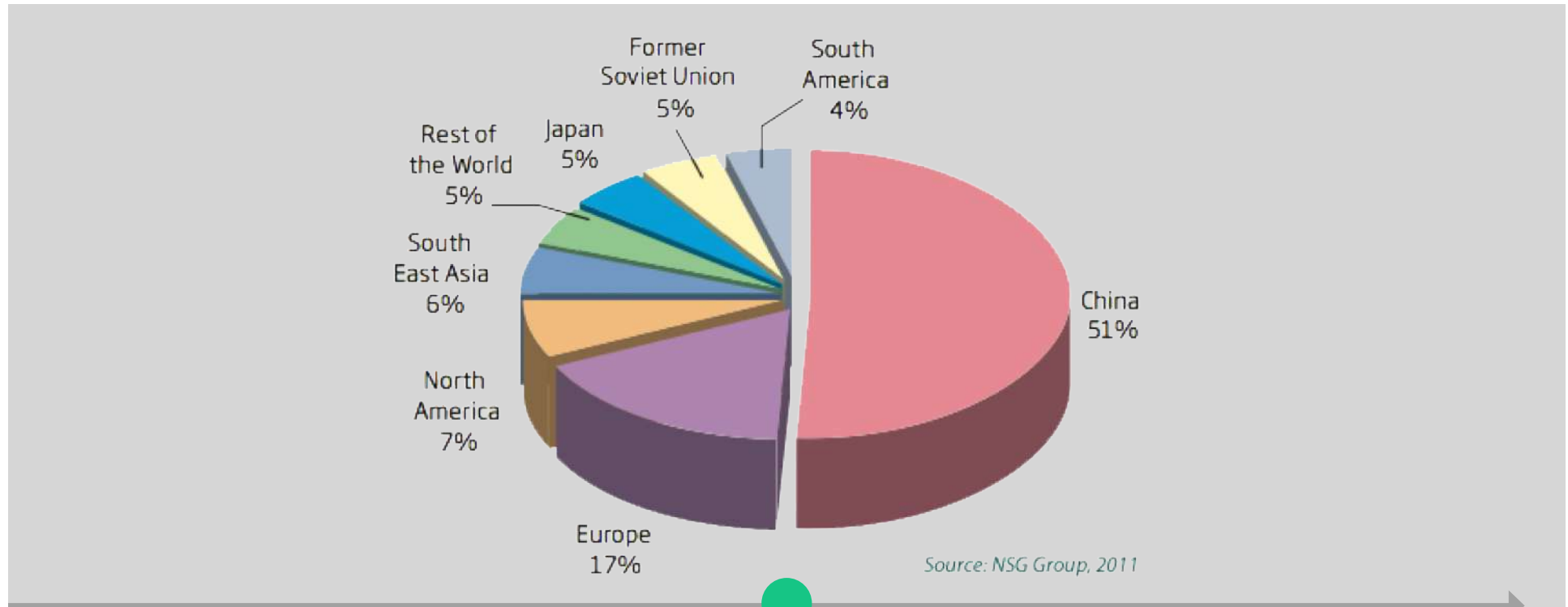


UN PRODUIT DE LUXE ? ...

« Celui-là est bien pauvre
dont la chambre n'est pas tapissée de
quelque plaque de verre »

Sénèque

... QUI DEVIENDRA UNE INNOVATION : VERRE PLAT, 70 MILLIONS DE TONNES/AN



Demande mondiale de verre feuilleté et de verre « *Float* »

En 2011

UN PROCÉDÉ ADAPTÉ BÉNÉFICIAINT DES PROGRÈS DE LA MÉTALLURGIE



VI^e – VII^e siècle

Four verrier - verre primaire
Site de Bet Eli'ezer en Israël

COMPOSITION : DU SABLE, DE LA CHAUX ET DE LA SOUDE...



SABLE
 SiO_2
Base

+

SOUDE
 Na_2O
 Na_2CO_3
Fondant

+

CHAUX
 CaO
 CaCO_3
Stabilisant



UN PRODUIT DE LUXE FAIT DE
MATIÈRES VULGAIRES ...

« ... **Une glace est un objet
précieux tiré des matières les plus
vulgaires ... »**

*La Manufacture des glaces de Saint-Gobain de 1665 à
1865 Augustin Cochin Membre de l'Institut 1865*

LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE

LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE



La décoration



L'architecture



Les objets, l'utile

LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE : LA DÉCORATION

Bracelet en perles de verre V^e siècle av. J.-C.



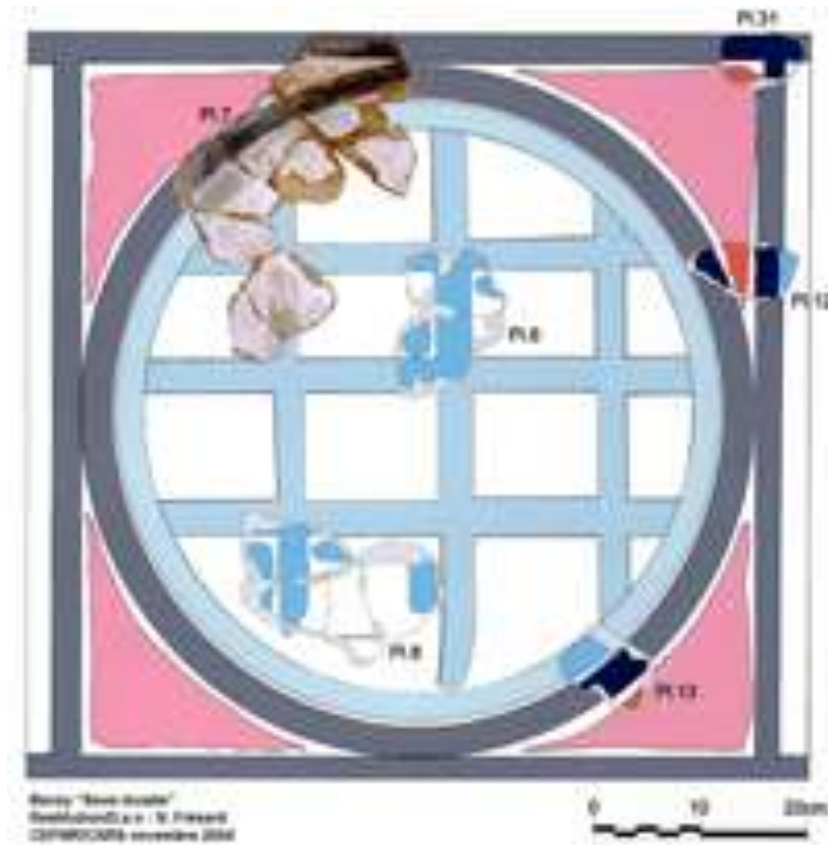
LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE : LA DÉCORATION

Vase de Portland, 1^{er} siècle av. J.-C. – camée de verre, Rome



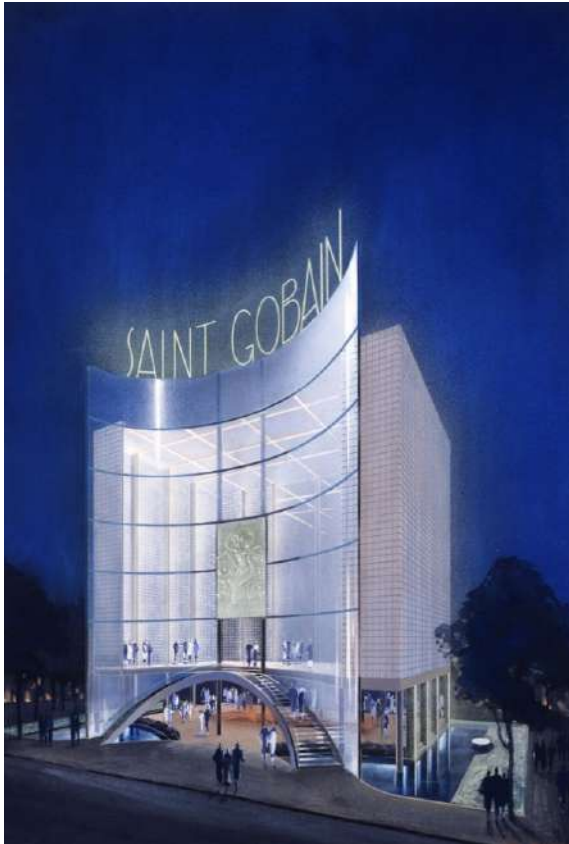
LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE : L'ARCHITECTURE

Architecture d'une fenêtre romaine, Herculaneum



LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE : L'ARCHITECTURE

Pavillon de Saint-Gobain, exposition universelle 1937 – Pyramide du Louvre



LES MARCHÉS HISTORIQUES DU VERRE : LES OBJETS, L'UTILE

Meubles René COULON en verre Securit



VERRE, COULEURS ET TRANSPARENCE ...

LES COULEURS DU VERRE



Fe^{2+} VERT / Fe^{3+} BRUN / Co^{2+} BLEU / Cr^{3+} VERT / Mn^{3+} POURPRE / ...

LE VERRE COLORÉ : L'INVENTION DES QUANTUM DOTS

De l'or et de l'argent
ajoutés à la composition
pour obtenir cet effet



Coupe de Lycurgue
IV^e siècle

LE VERRE RUBIS REDÉCOUVERT : MURANO PUIS CRANBERRY

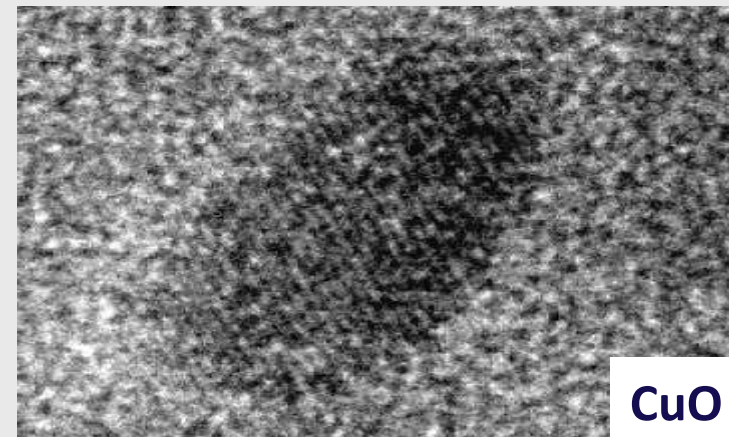
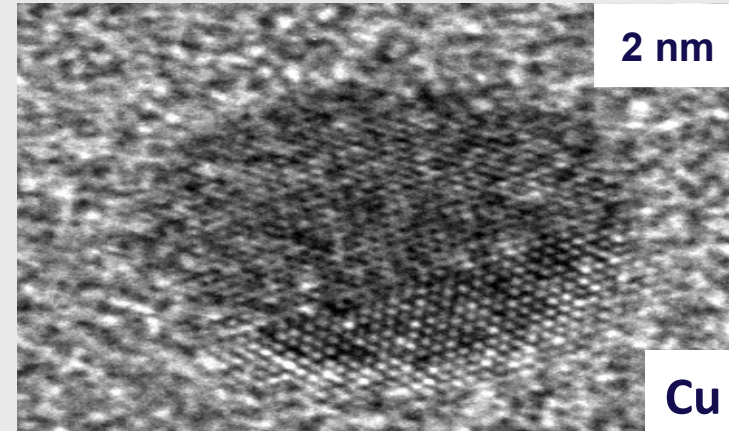


Le verre Rubis – MURANO
XV^e siècle

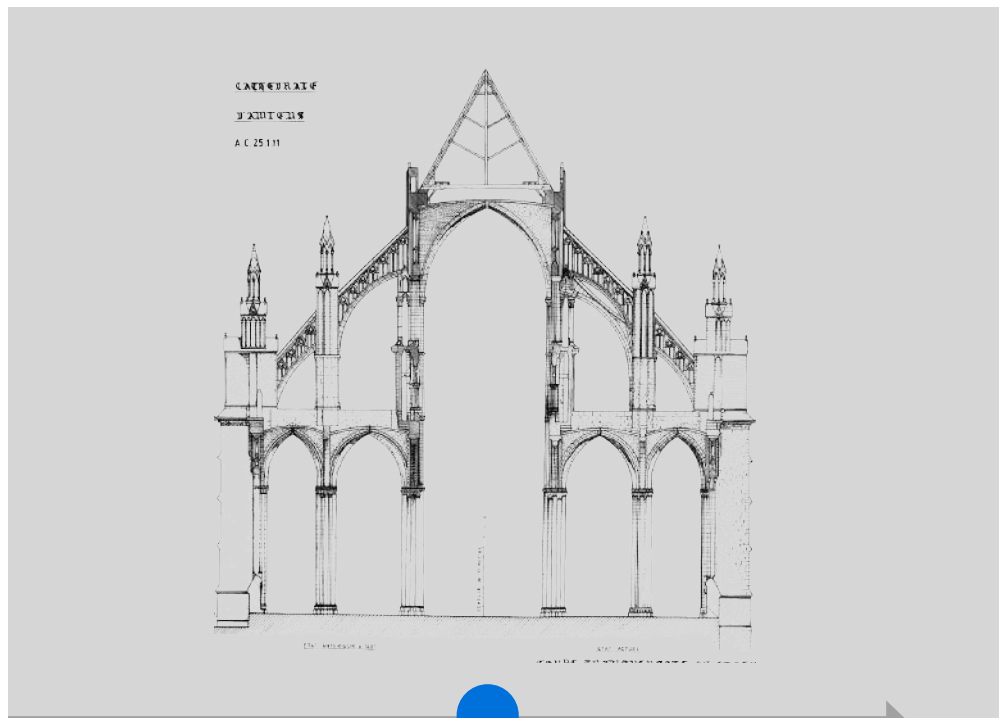


Le Cranberry Glass
XIX^e siècle

LES VERRES COLORÉS : LES COULEURS « ÉLECTRONIQUES » – AGRÉGATS DE CUIVRE

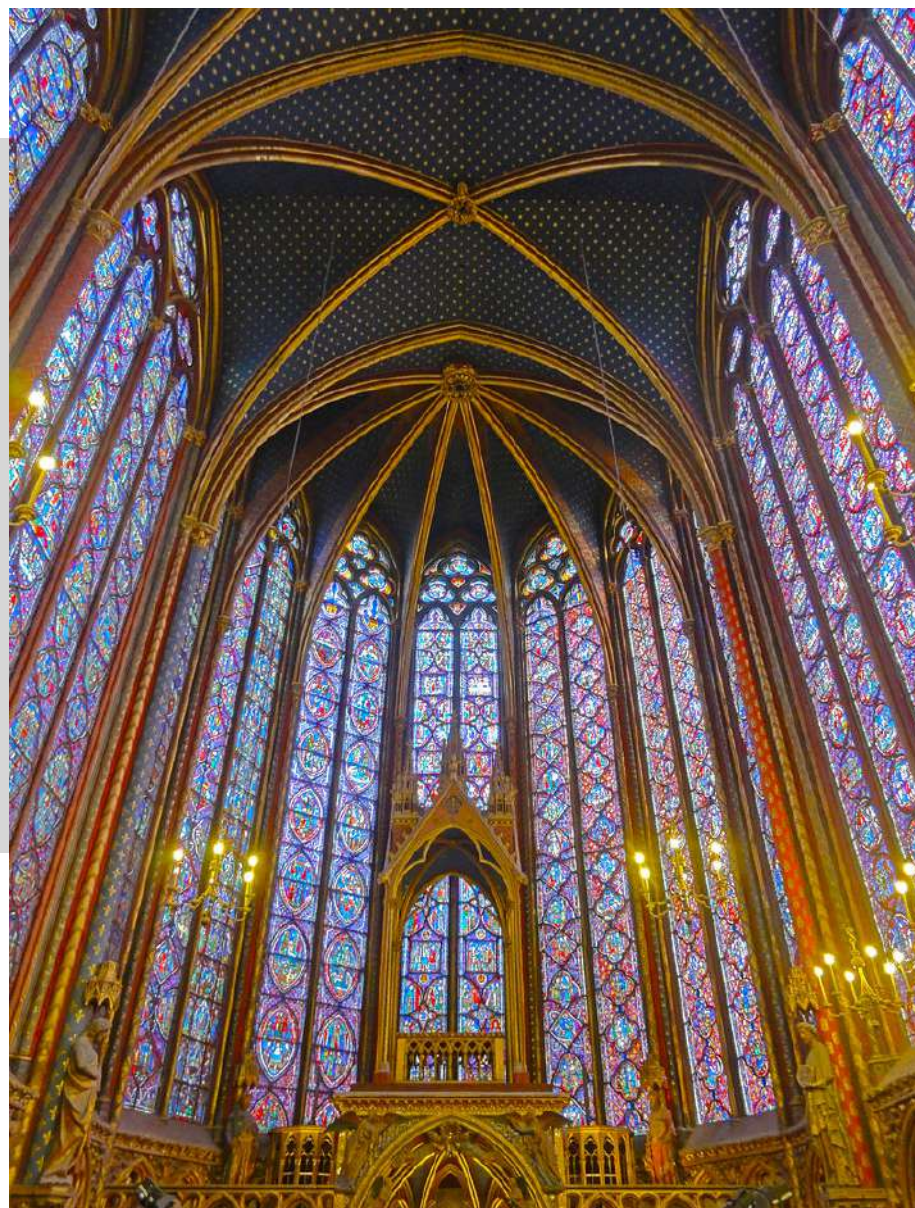


L'INVENTION DES VITRAUX... ET DU VITRAGE



Agrandissement des ouvertures
Jusqu'à 2/3 des coûts de la construction !

LE GOTHIQUE



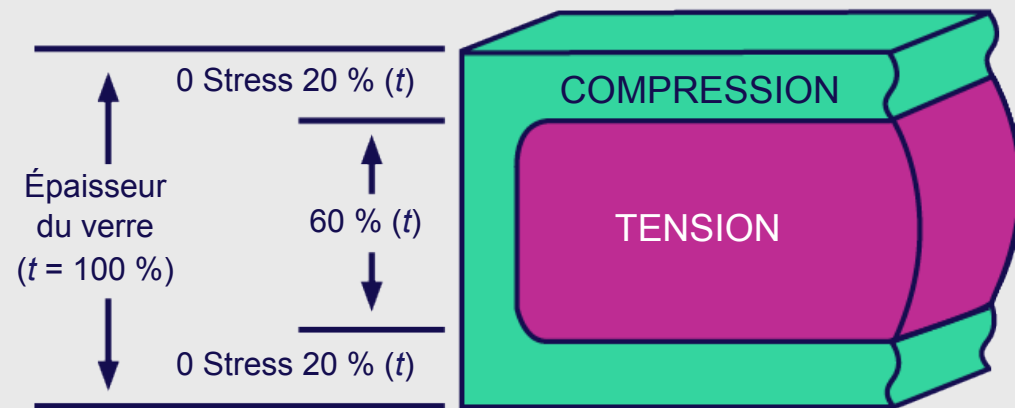
Contrôler les propriétés du verre

Optimisation de sa résistance, sa transparence etc...

CONTRÔLER LES PROPRIÉTÉS DU VERRE :
LA FRAGILITÉ, OPTIMISER SA RÉSISTANCE

LE VERRE TREMPÉ À CHAUD

Refroidissement très rapide pour une mise en tension du verre



LE VERRE TREMPÉ À CHAUD

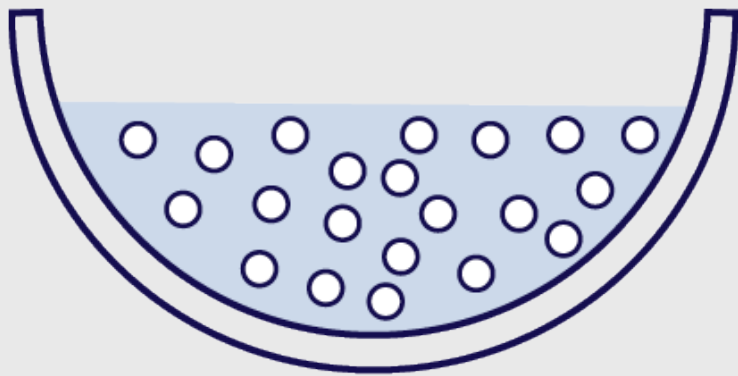


LE VERRE TREMPÉ CHIMIQUEMENT

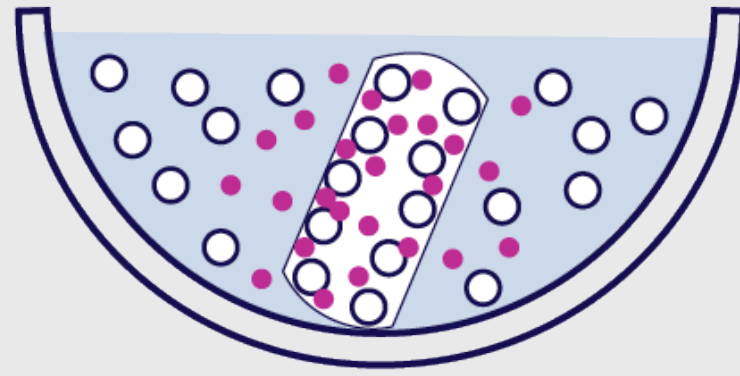
Un échange d'ions



- Na⁺ (Sodium)
- K⁺ (Potassium)



AVANT



APRÈS

Cockpit d'avion



LE VERRE TREMPÉ CHIMIQUEMENT : UN VERRE FIN ET SOLIDE, LE VERRE GORILLA (CORNING)

Utilisé pour les écrans : finesse et solidité



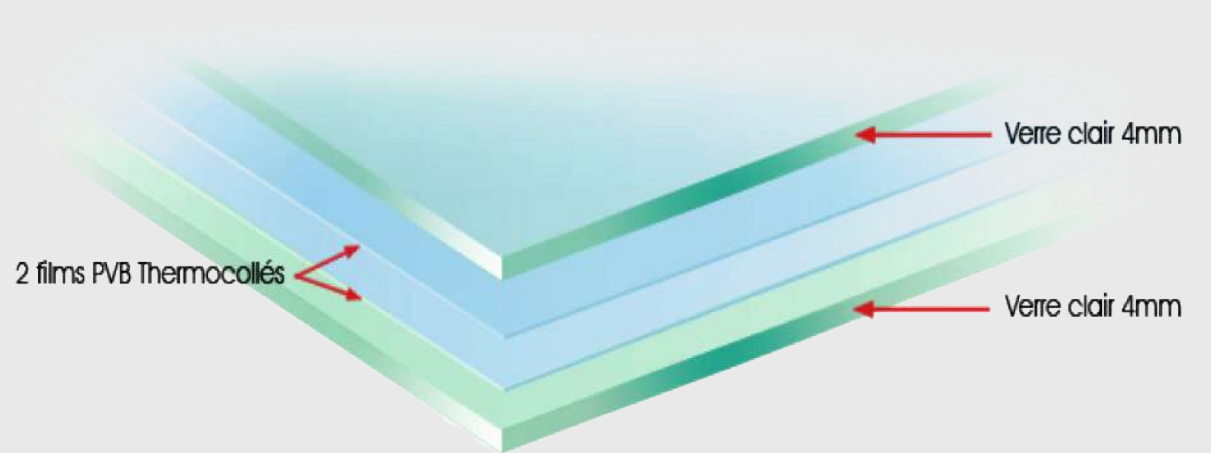
3 BILLION
devices
strong.

ET CELA RÉSISTE ...

CORNING

LE VERRE FEUILLETÉ

PRÉVENIR LES DANGERS DES ÉCLATS DE VERRE



LA DÉCOUVERTE ACCIDENTELLE ...



1903



Découverte du procédé
du verre SECURIT

Edouard BENEDICTUS

QUI DEVINT UNE INNOVATION : LE VERRE TRIPLEX



67% des accidents d'automobiles
sont causés par les éclats de verre

Avec le verre
TRIPLEX
jamais d'éclats ni de blessures

Créateur le photographe d'une
grande le célèbre de M. D. ...
C'est à lui que l'on doit la
l'invention d'un verre à un
passage à l'épreuve et généralement
résistant.

Verre aux Glaces **TRIPLEX**,
M. D. ... un verre unique en son
de verre et qui n'est pas un verre à un
accident qui aurait pu être évité.

Remarque la seule position
pour l'usage est de l'usage
à la **TRIPLEX**, quel verre
soit-il ne s'est jamais
qu'elle soit généralement résistante.

Société du **VERRE TRIPLEX**
11, Rue Oudinot - PARIS (8^e)

*Las de danger
d'être défigurée!!*

aucun
éclat
ne peut se
D'UN: détacher
**VERRE
TRIPLEX**

Société du **VERRE TRIPLEX**
TÉLÉPHONE: 709-28 17. rue Desnouettes - PARIS

UN PARE-BRISE QUI SAUVE DES
VIES



« Au verre Triplex qui m'a sauvé la vie »

Le chauffeur de CLÉMENCEAU

ET HERGÉ LE SAVAIT BIEN ...



DIDIER ROUX

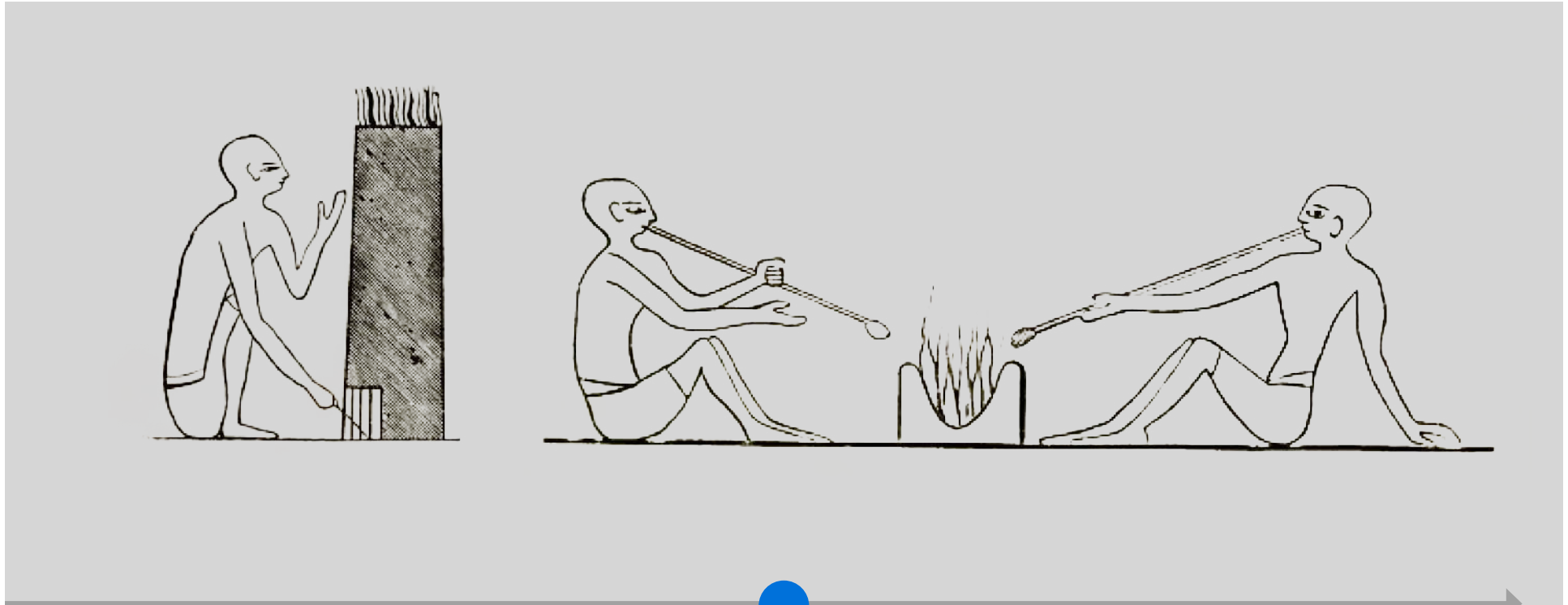
La saga du Verre

Les procédés au cours du temps



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

LA FABRICATION DÉCRITE À THÈBES (ÉGYPTE)



ÉGYPTE ANTIQUE

-2000 av. J.-C.

PROCÉDÉS VERRIERS



La fusion



La mise en forme

UNE RÉACTION PHYSICO-CHEMIQUE COMPLEXE



LES FOURS VERRIERS

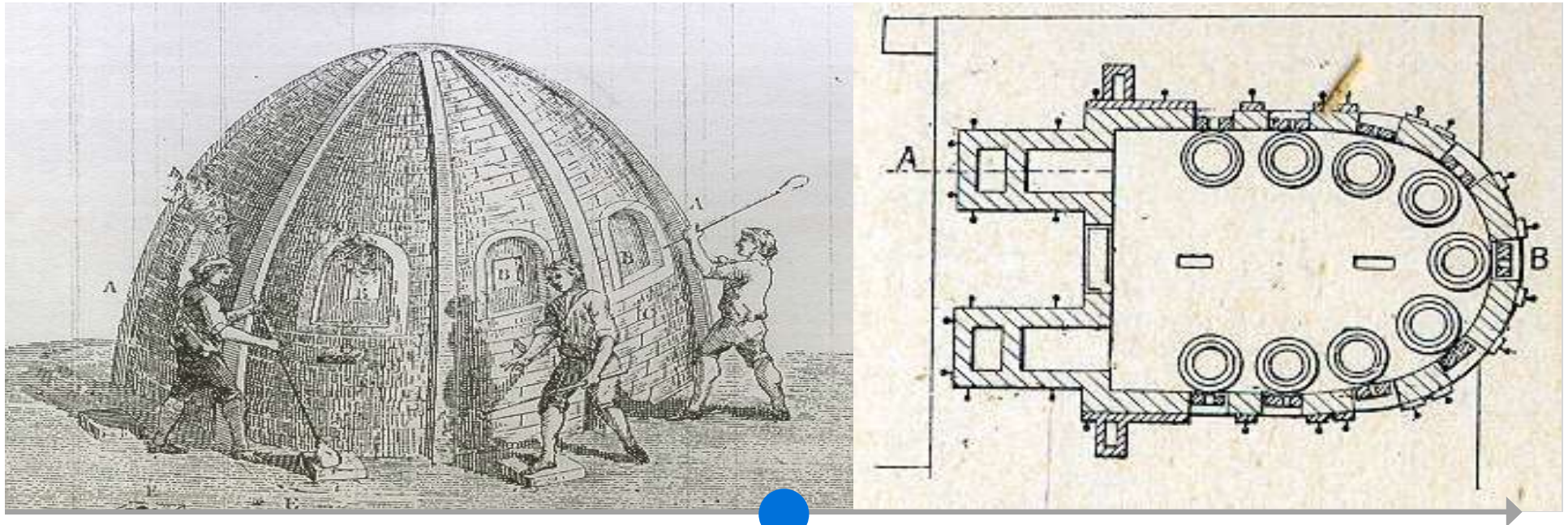
LES PREMIERS FOURS ...



VI^e – VII^e siècle

Four verrier - verre primaire
Site de Bet Eli'ezer en Israël

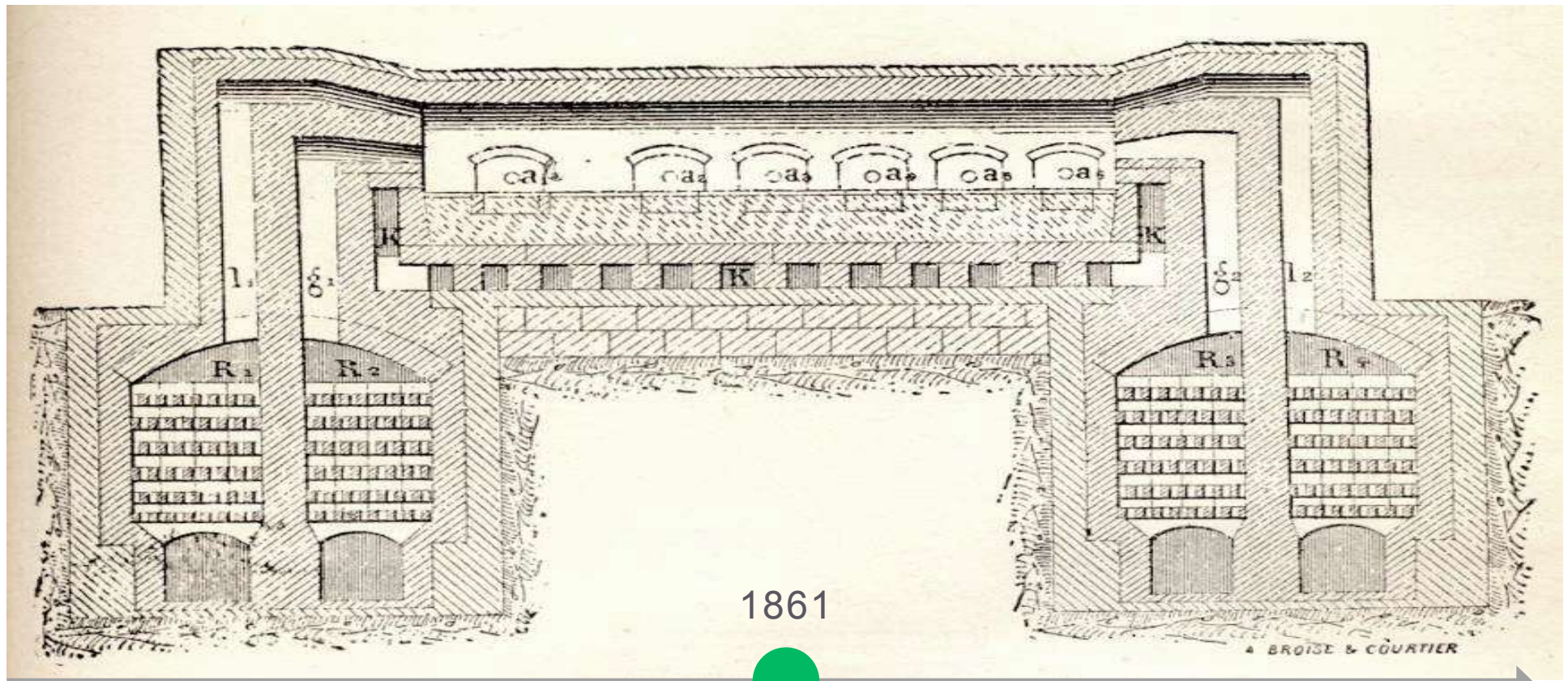
LES PREMIERS FOURS ... LES FOURS RÉFRACTAIRES (EN TERRE CUITE)



Moyen âge

Four verrier pour la fusion – four à creusets

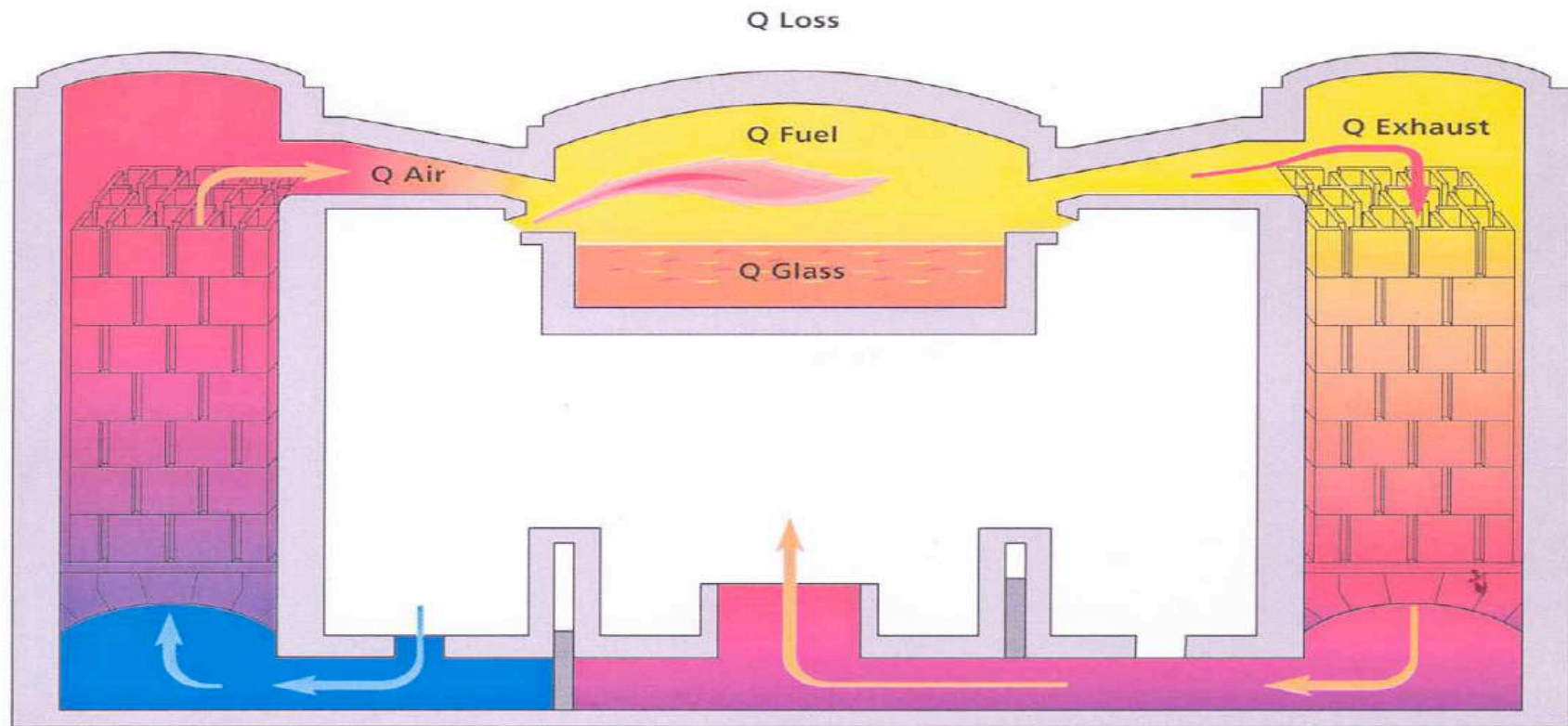
... IL Y A 150 ANS : RÉCUPÉRER LA CHALEUR DE COMBUSTION : SIEMENS



1861

Four verrier – SIEMENS
un four avec des régénérateurs de chaleur

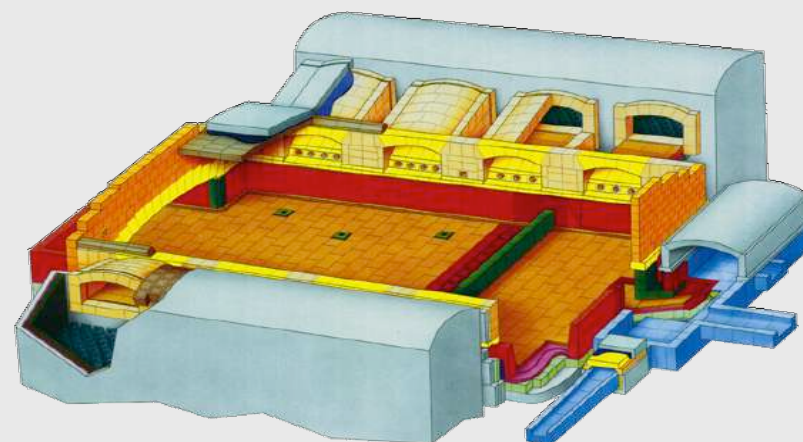
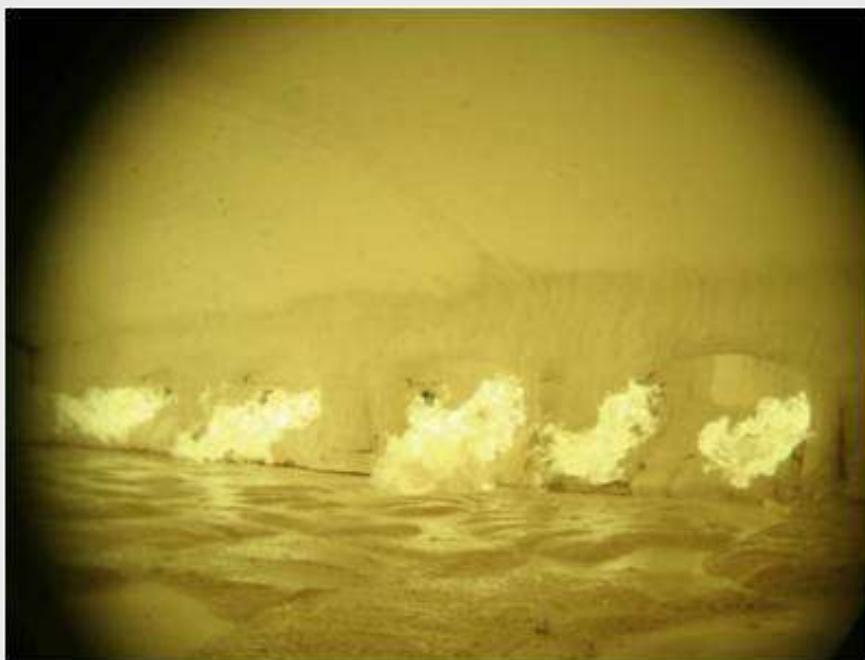
... UNE IDÉE TOUJOURS D'ACTUALITÉ EN 2007




Four verrier – ACTUEL

... LA FUSION CONTINUE DES FOURS MODERNES

Four à bruleur transversal



QUELQUES CHIFFRES ... UNE USINE DE VERRE PLAT



Un float
produit environ
1000 tonnes / jour
pendant 15 ans
presque sans s'arrêter

SAINT-GOBAIN GLASS, BHIWADI PLANT

La Glace et le Verre à vitre ...

Une longue évolution des procédés avant la convergence

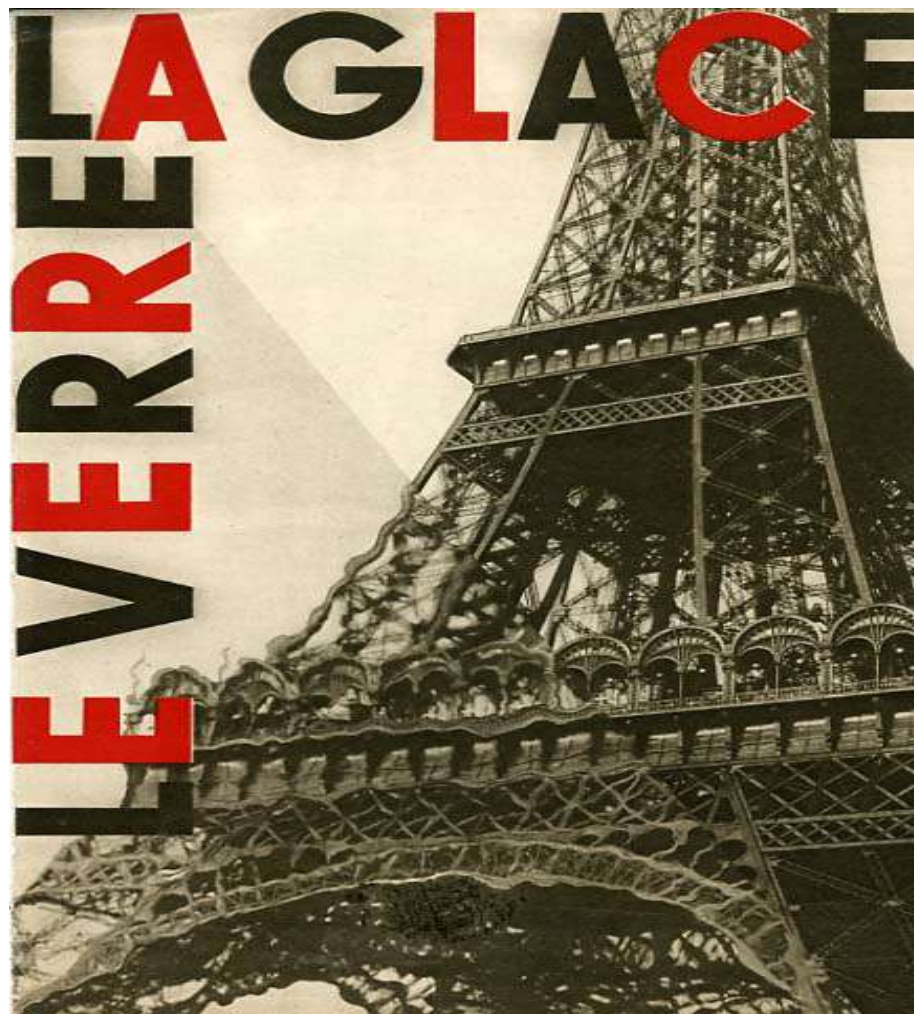


LES ÉVOLUTIONS DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA GLACE

LA GLACE ET LA VITRE



LA GLACE ET LE VERRE : AFFICHE DE 1932...

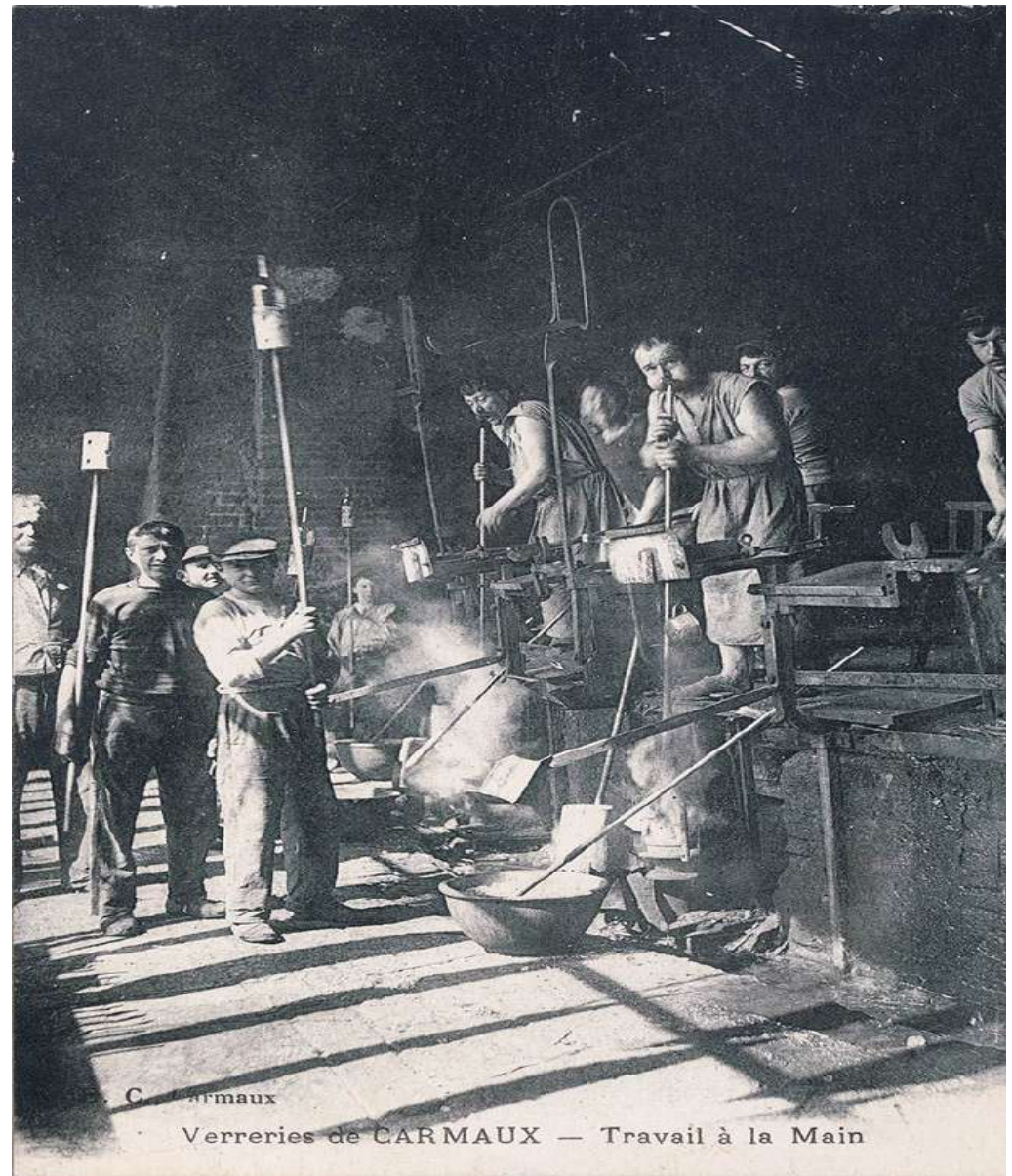


Saint-Gobain Archives



SAINT-GOBAIN

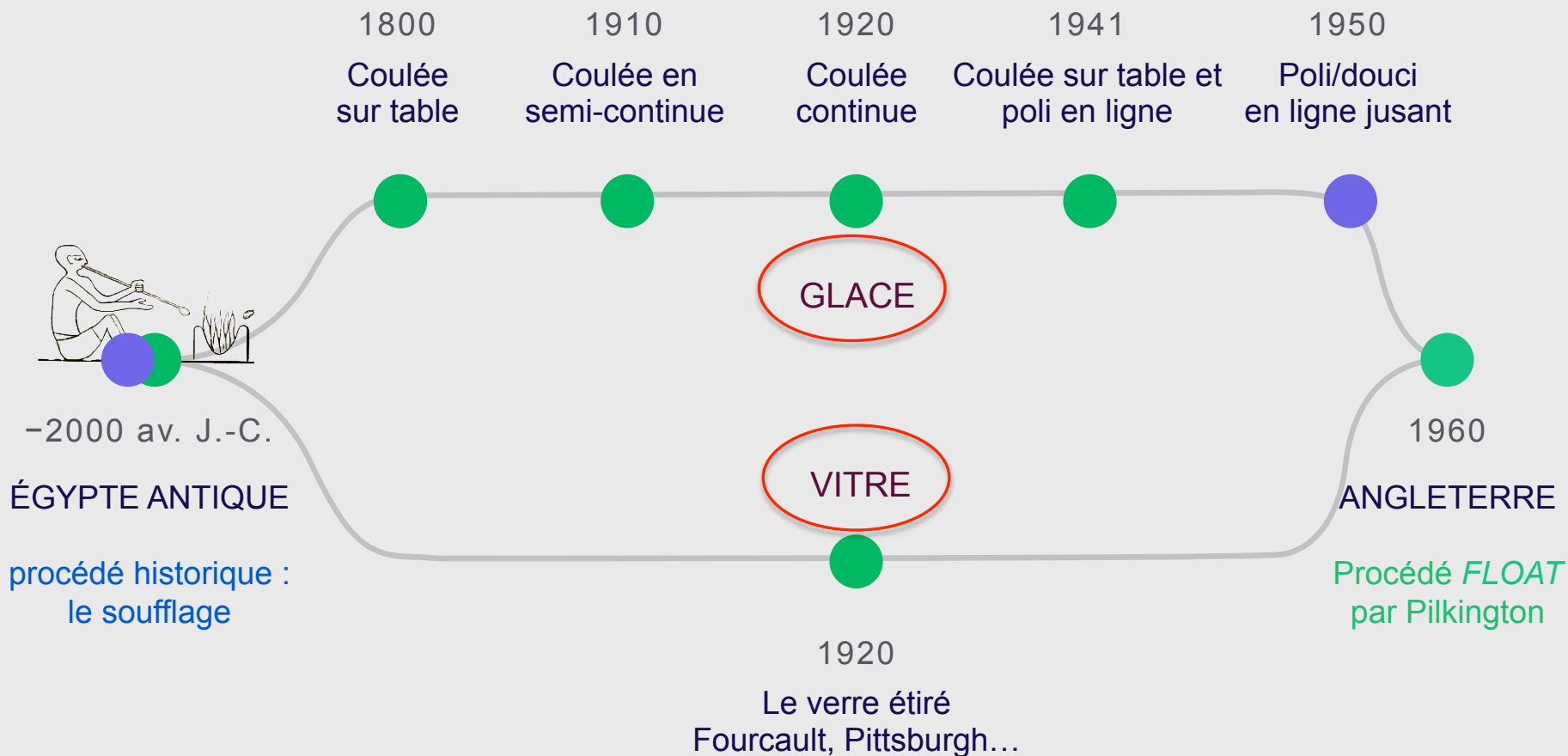
LE VERRE SOUFFLÉ



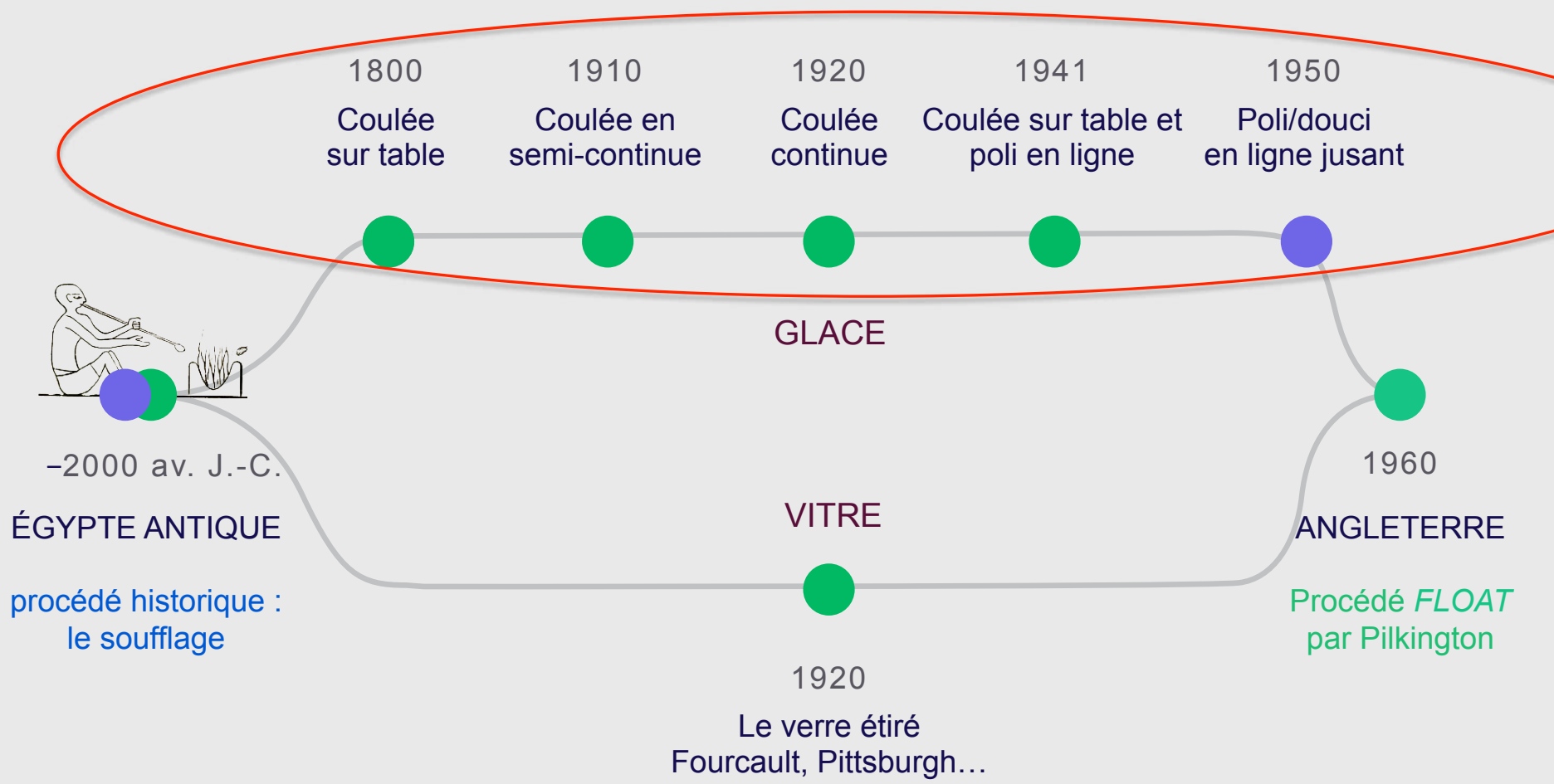
C. Carmaux

Verreries de CARMAUX — Travail à la Main

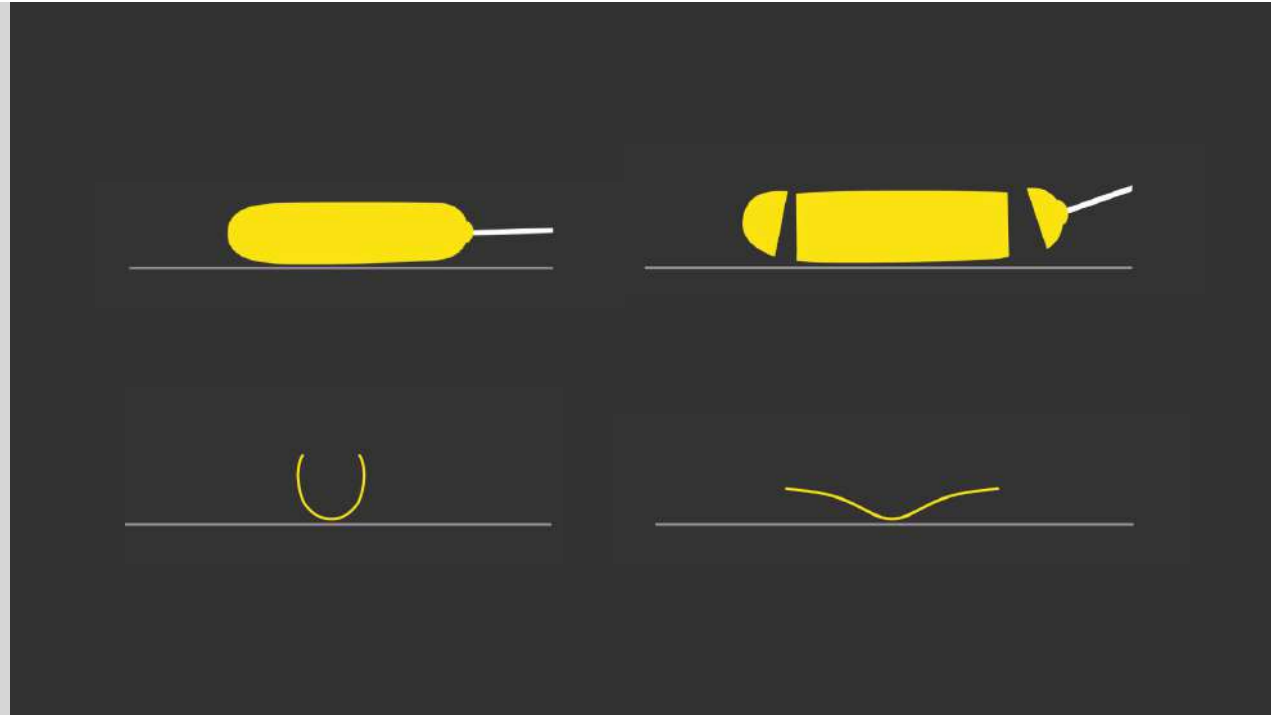
LA FABRICATION DU VERRE ET DE LA GLACE : PARCOURS PARALLÈLES ... ET INÉGAUX



LA FABRICATION DU VERRE ET DE LA GLACE : PARCOURS PARALLÈLES ... ET INÉGAUX



LE VERRE SOUFFLÉ POUR LA GLACE



Le verre soufflé

LA COULÉE SUR TABLE

Visite de la duchesse de Berry à Saint-Gobain en 1822



LA COULÉE SUR TABLE, DE L'INVENTION DE L'ARTISAN À L'INNOVATION INDUSTRIELLE



Bernard PERROT

1662

Par accident il découvre que du verre tombé sur une lame de fer en prend la forme : il en fait des médaillons



Louis Lucas DE NEHOU

1691

applique ce procédé à la fabrication de Glace ; procédé transféré à SAINT GOBAIN

LA COULÉE SUR TABLE, DE L'INVENTION DE L'ARTISAN À L'INNOVATION INDUSTRIELLE



Bernard PERROT

1662

Par accident il découvre que du verre tombé sur une lame de fer en prend la forme : il en fait des médaillons



Louis Lucas DE NEHOU

1691

applique ce procédé à la fabrication de Glace ; procédé transféré à SAINT GOBAIN



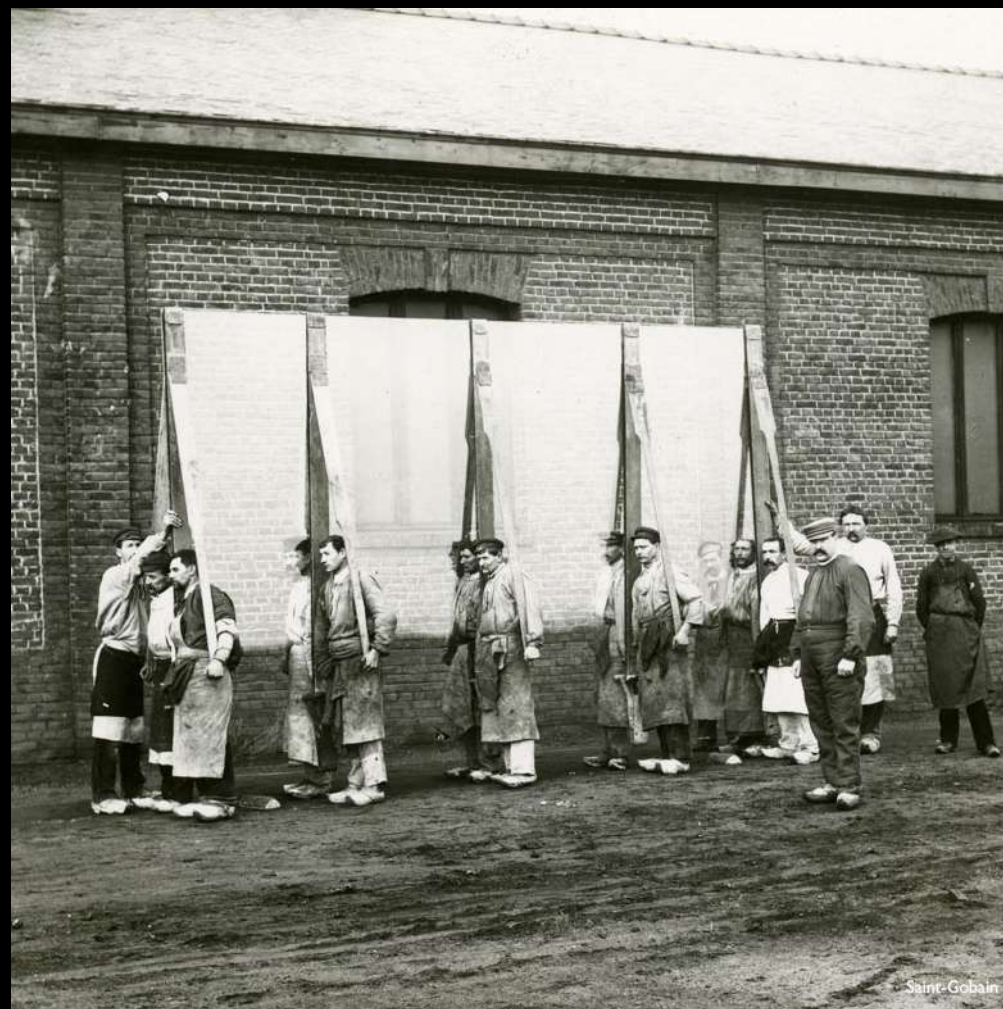




COULÉE SUR TABLE EN 1950...



PERMETTANT D'OBTENIR DE GRANDES GLACES...



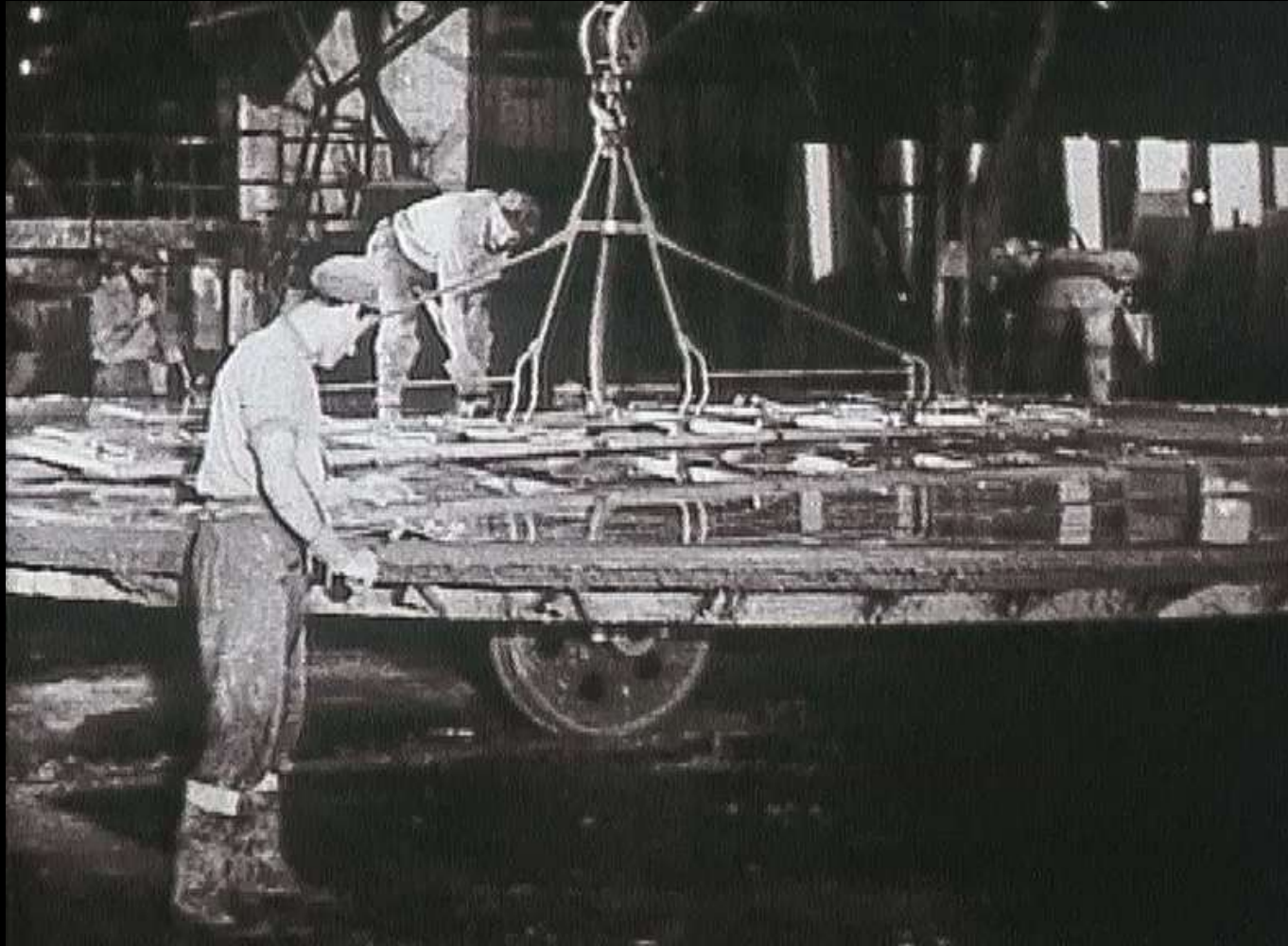
LES ÉTAPES / LA DANSE DES SABOTS ...



LES ÉTAPES / LE DOUCISSAGE



LES ÉTAPES / LE POLISSAGE



LE PROCÉDÉ JUSANT : COULÉE CONTINUE DOUCIE-POLIE EN LIGNE PROCÉDÉ JUSANT

AMÉLIORER LA COULÉE CONTINUE - 1959 (Usine de Chantereine)

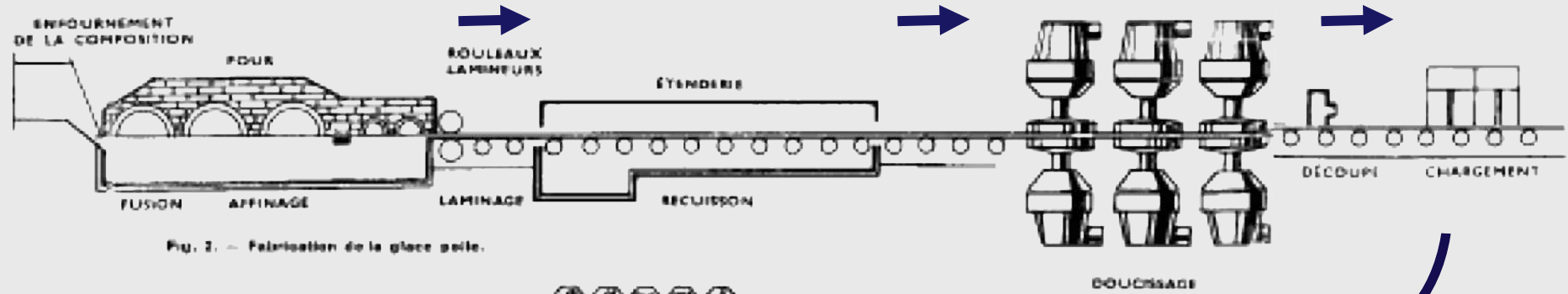
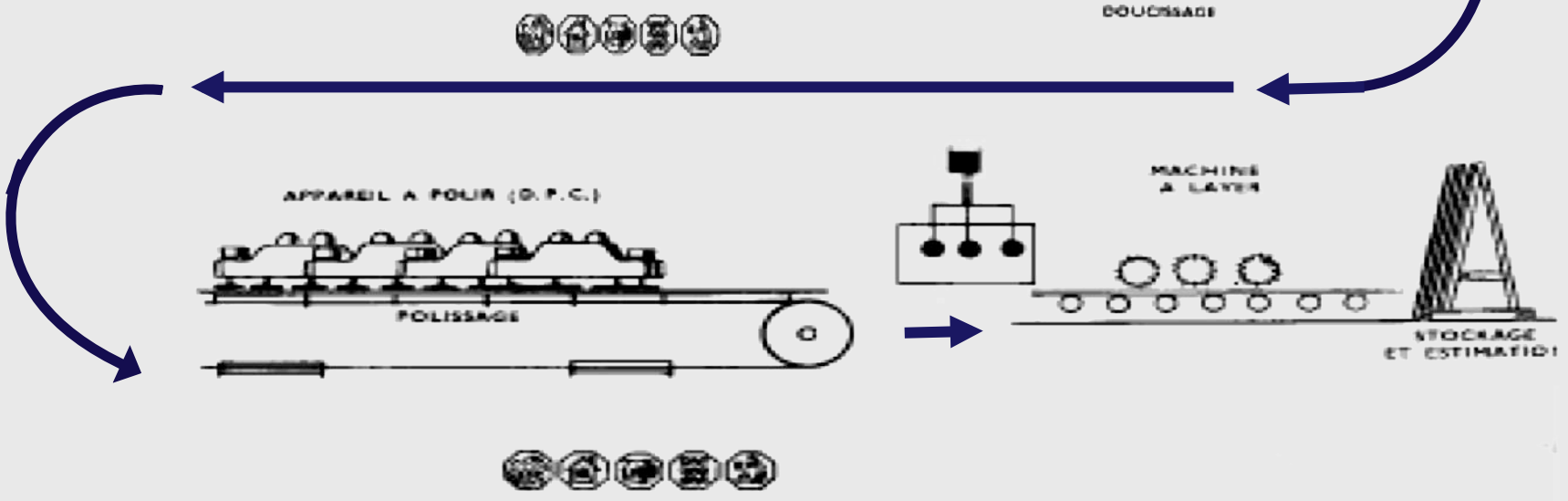
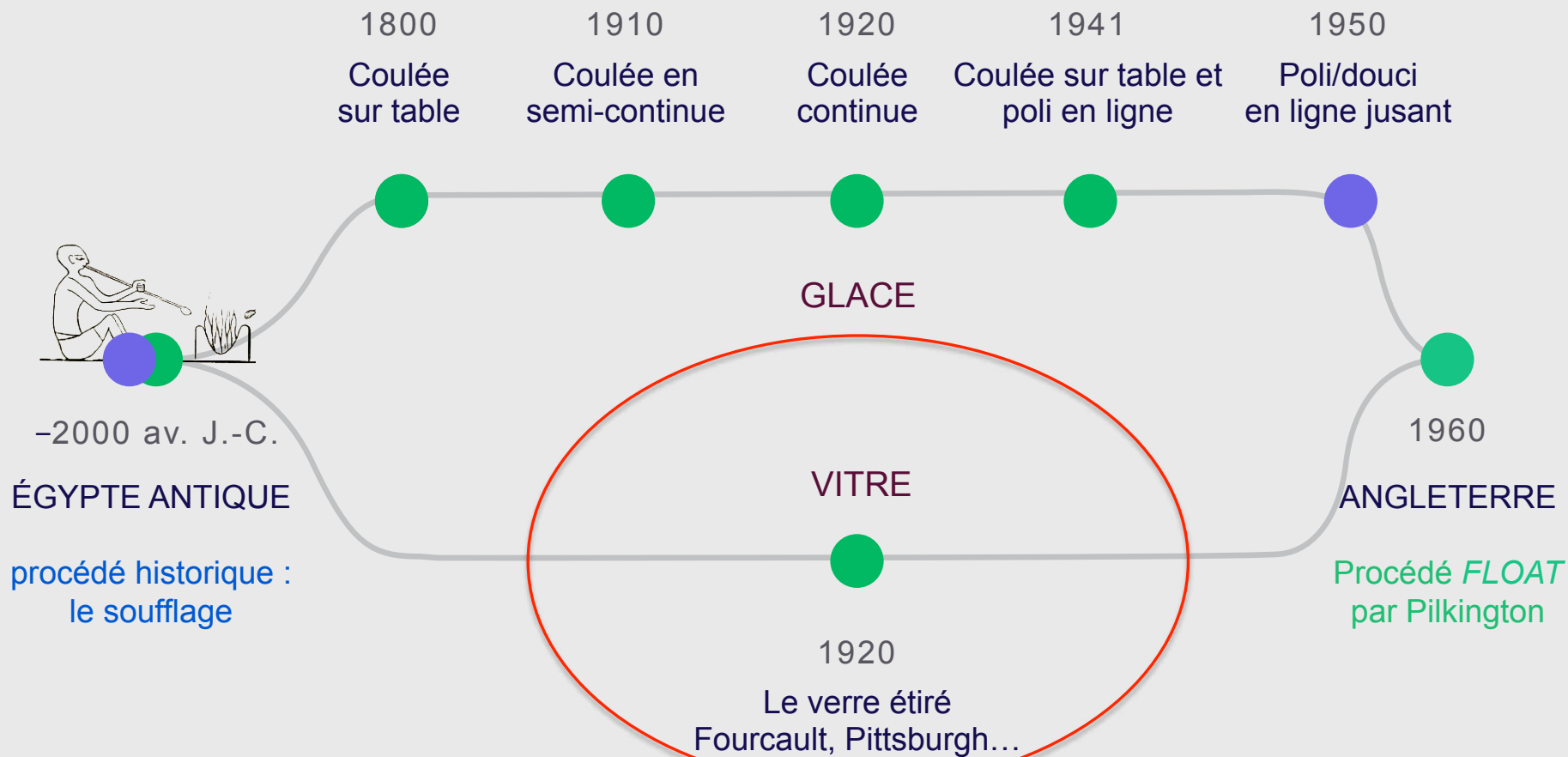


Fig. 2. - Fabrication de la glace peile.



LA FABRICATION DU VERRE ET DE LA GLACE : PARCOURS PARALLÈLES ... ET INÉGAUX





LES ÉVOLUTIONS DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA VITRE

LE VERRE SOUFLÉ POUR LES VITRES



LE VERRE SOUFLÉ POUR LES VITRES



UN PROGRÈS TARDIF POUR
LE VERRE À VITRE : L'ÉTIRAGE

UN PROGRÈS TARDIF POUR LE VERRE À VITRE : L'ÉTIRAGE

Les procédés FOURCAULT, PITTSBURGH, COLBURN, LIBBEY-OWENS

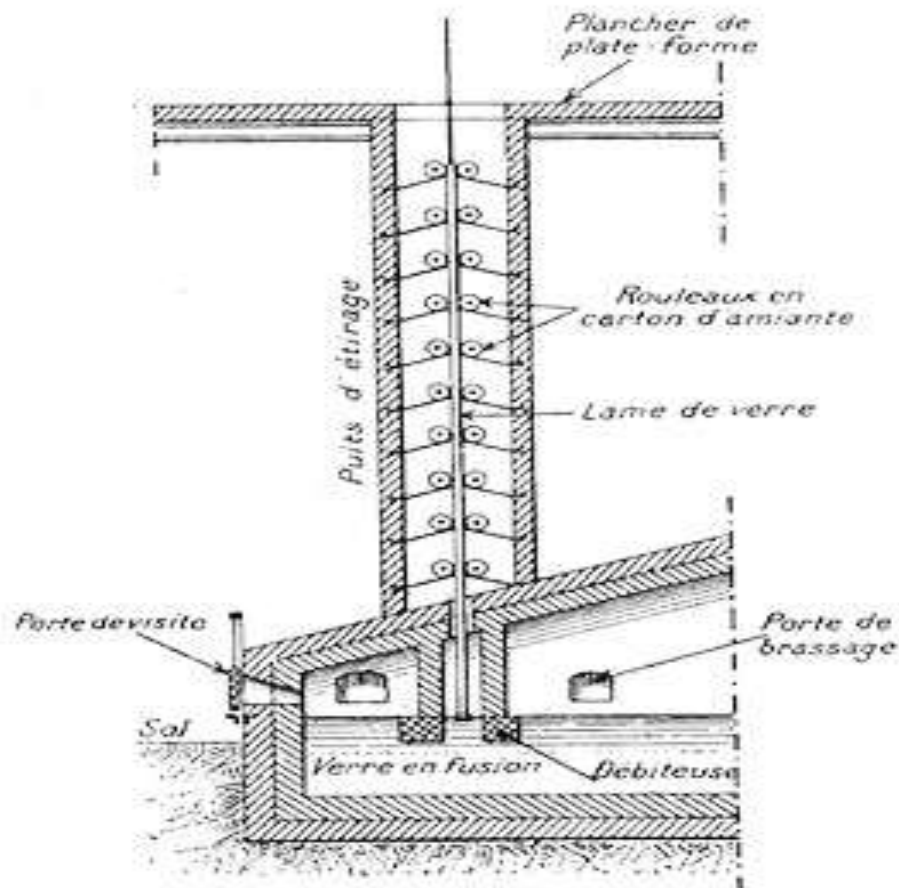


Fig. 2. — Fabrication mécanique du verre à vitres par le procédé Fourcault.

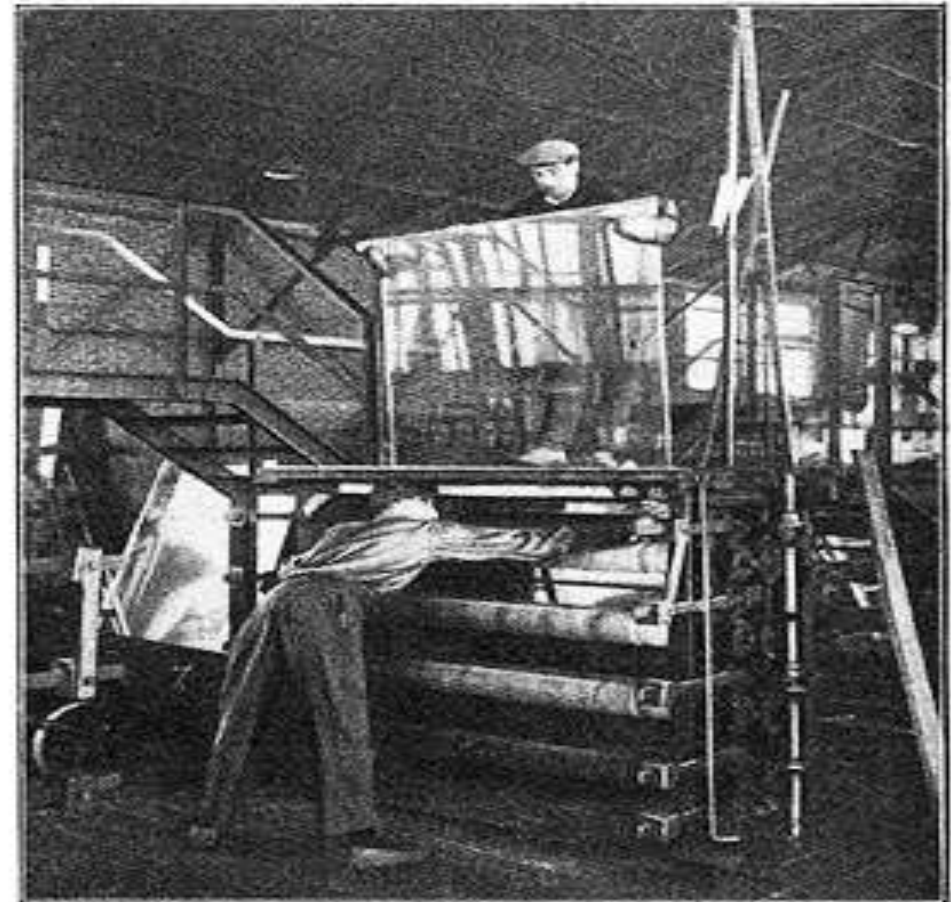
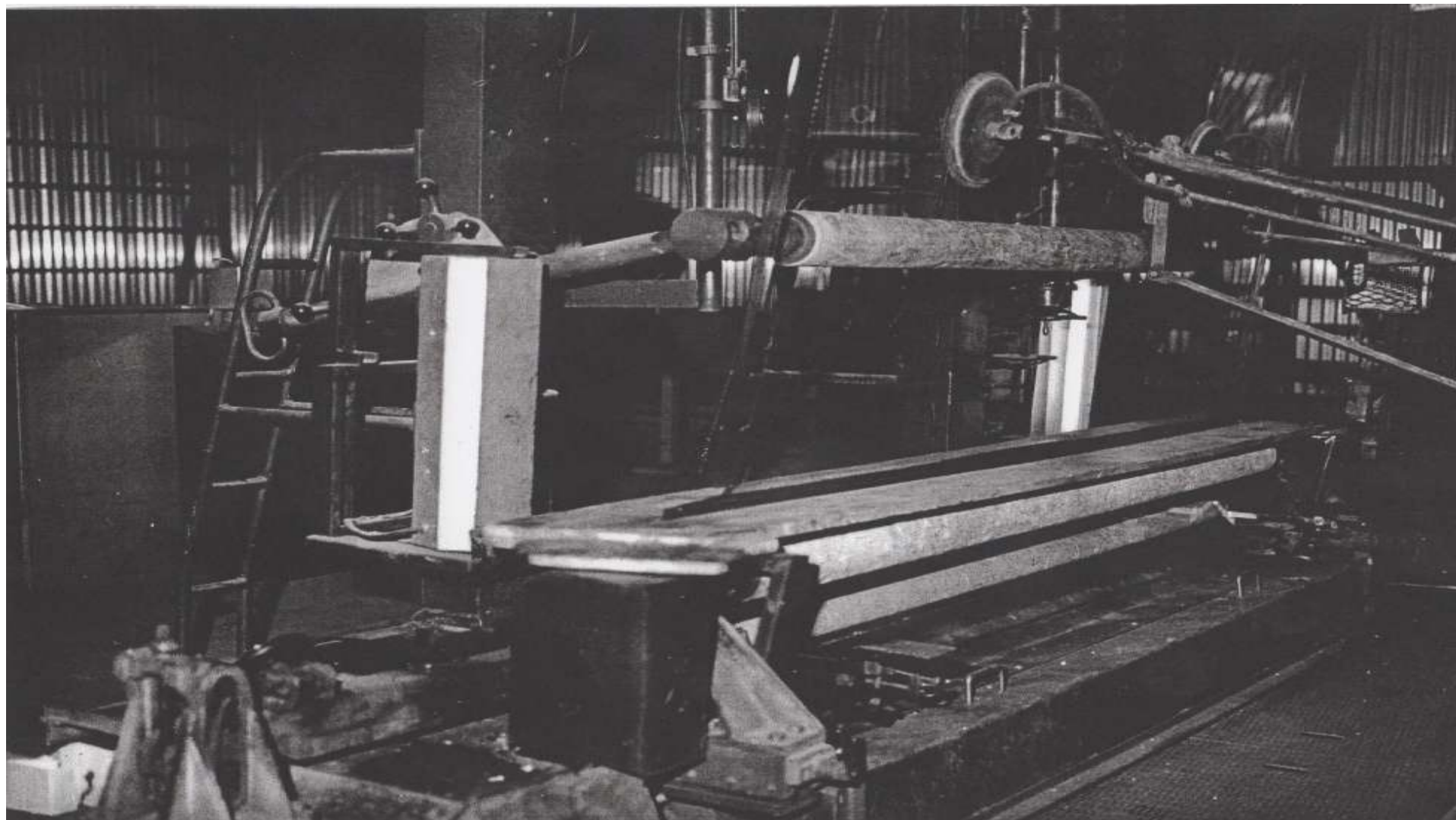


Fig. 9. — Le procédé Fourcault. — Coupage de la feuille au sortir du puits (communiqué par la Revue Glaces et Verres).

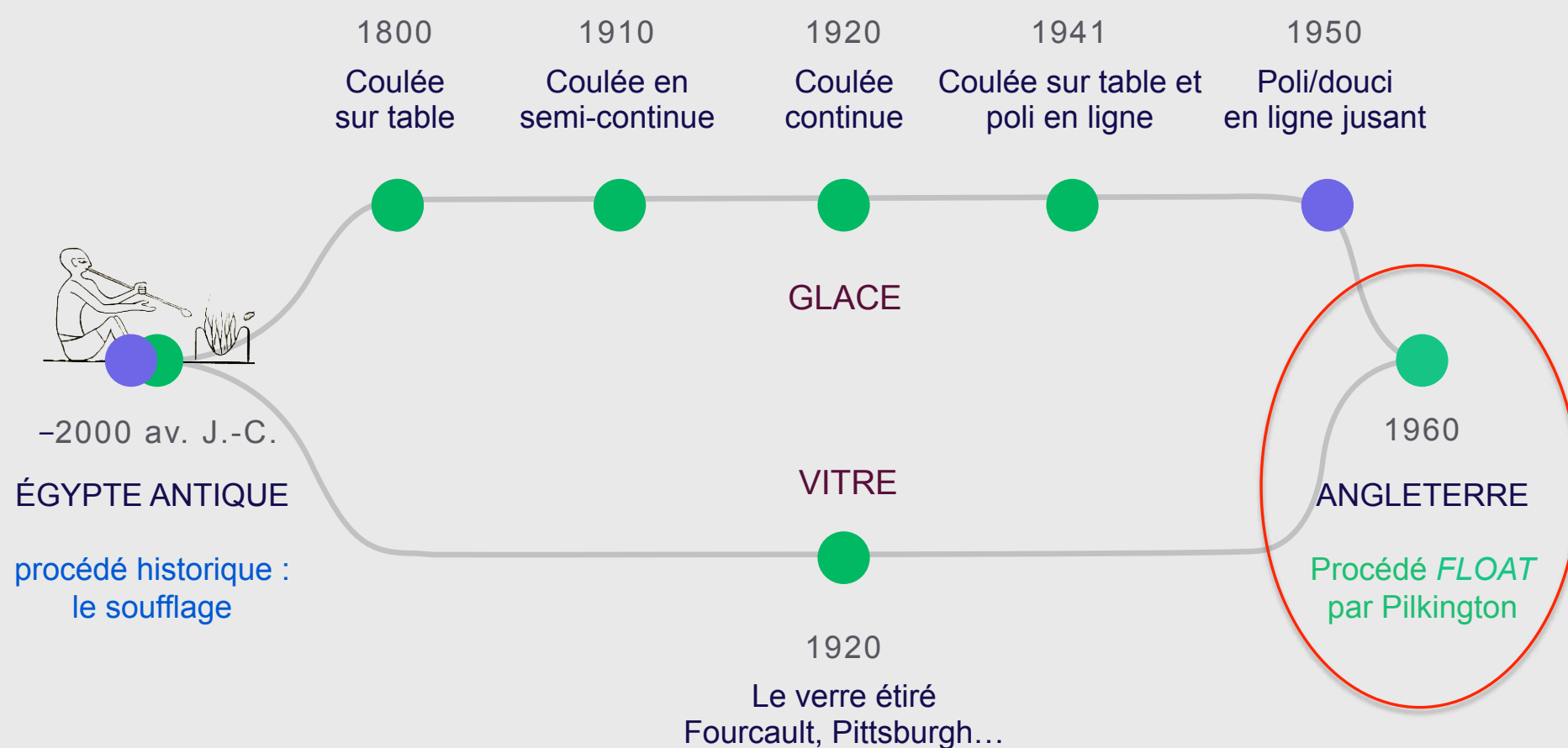
LE PROCÉDÉ PITTSBURGH



LE PROCÉDÉ PITTSBURGH



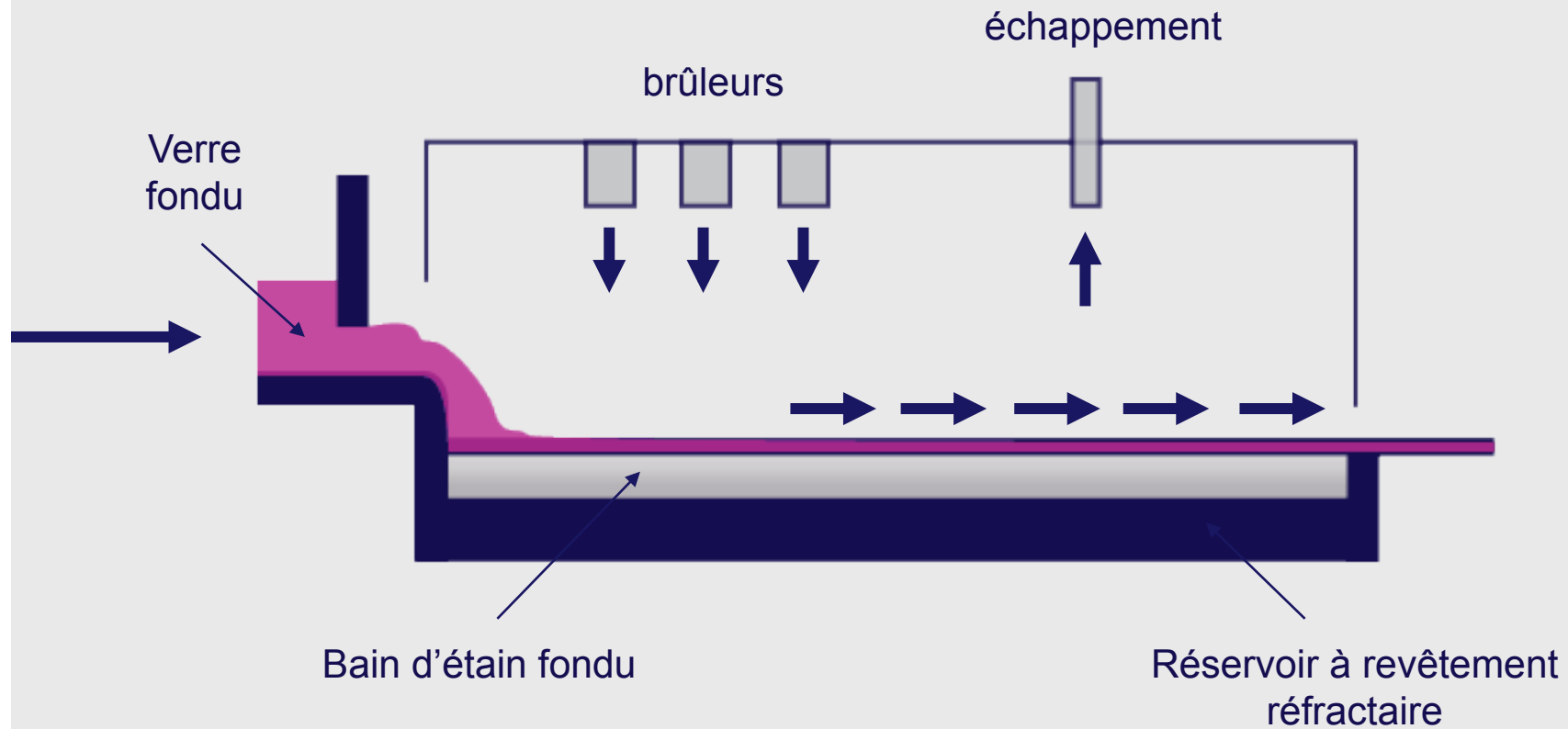
LA FABRICATION DU VERRE ET DE LA GLACE : PARCOURS PARALLÈLES ... ET INÉGAUX



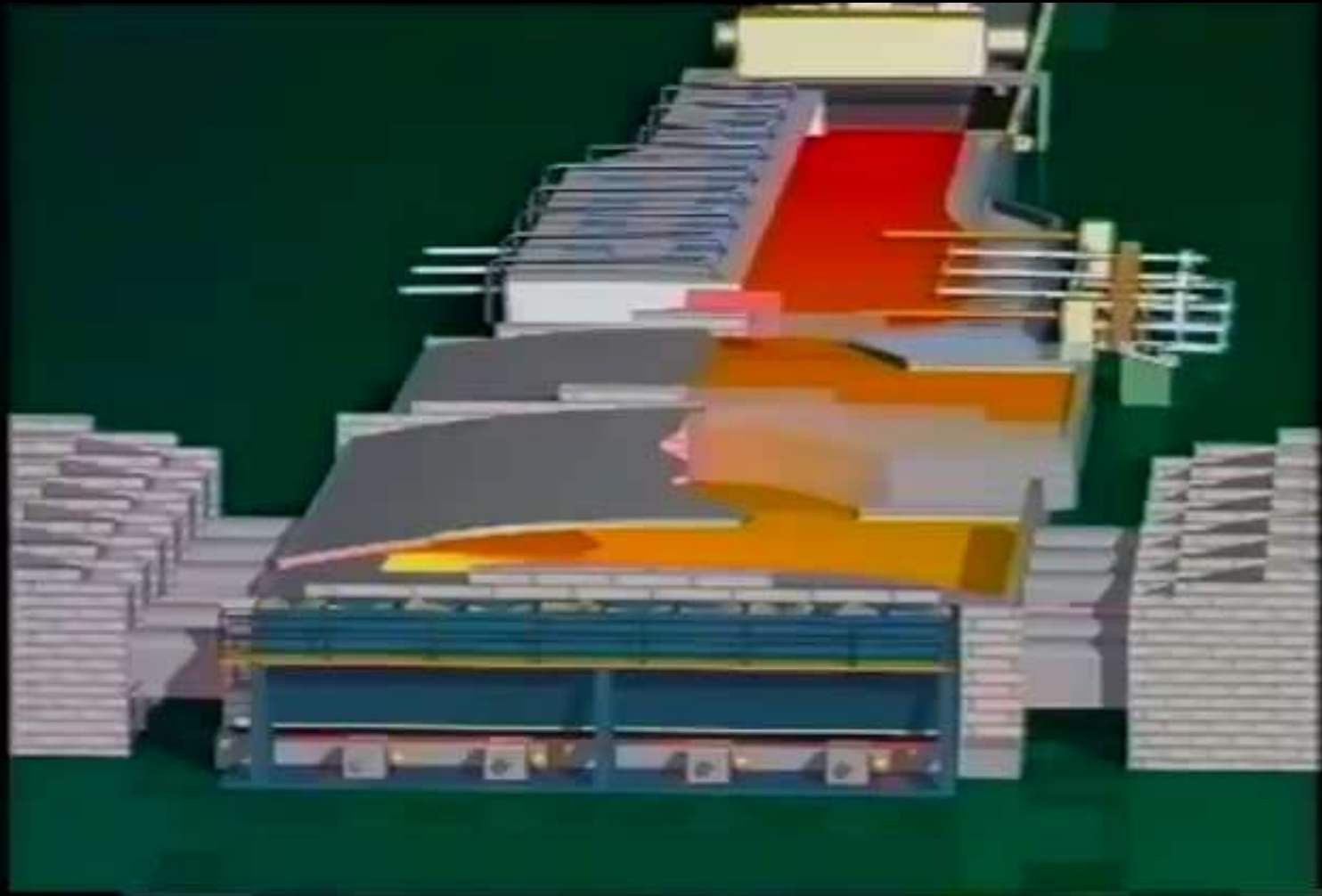
LE PROCÉDÉ *FLOAT* :
UNE INNOVATION RADICALE DE PILKINGTON

LE FONCTIONNEMENT DU FOUR VERRIER MODERNE

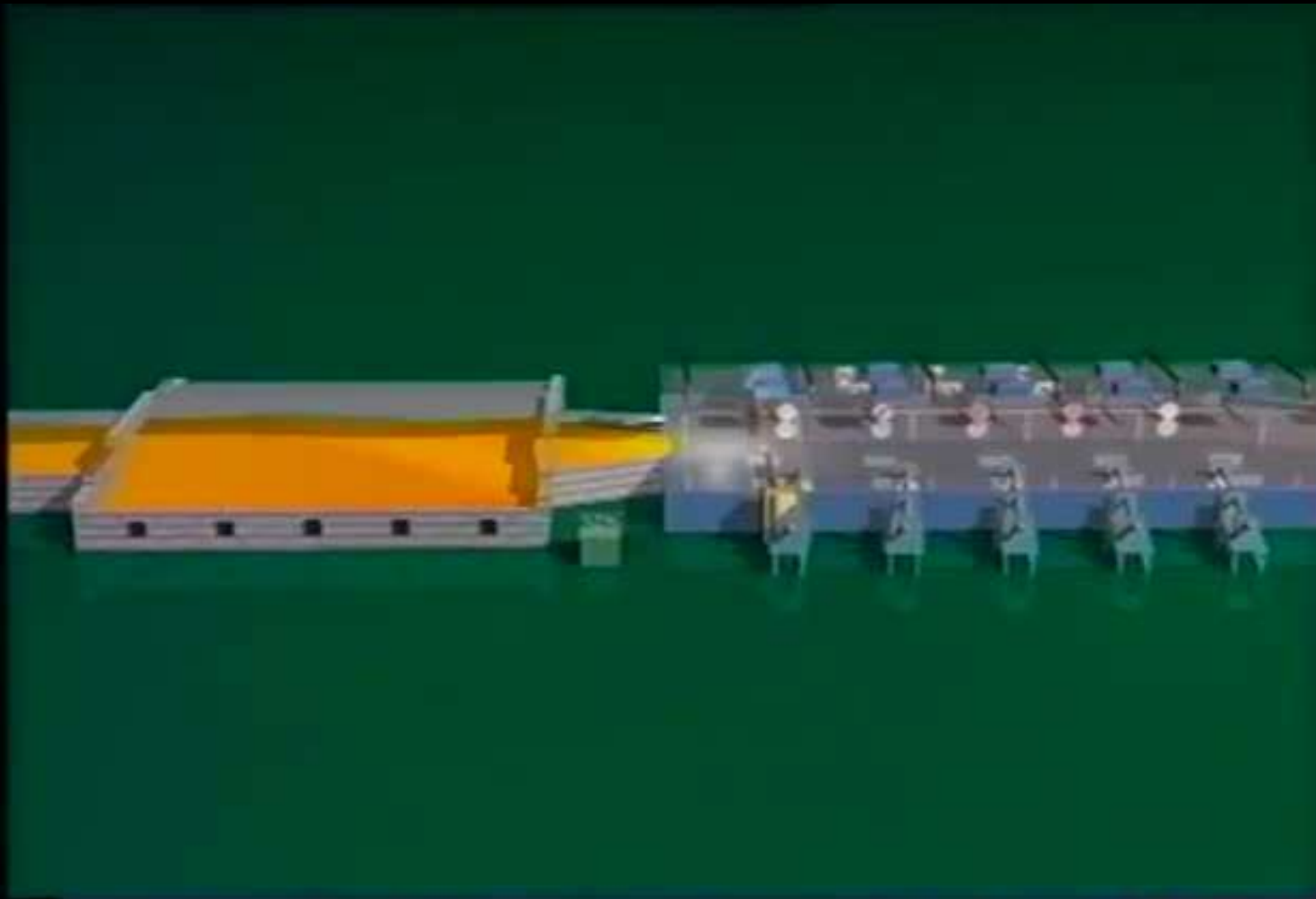
LE VERRE S'ÉCOULE DANS UNE GRAND FOUR À ZONE FLOTTANTE



LE *FLOAT* - PILKINGTON



LE *FLOAT* – PILKINGTON : RÔLE DES *TOP ROLLS*



L'INVENTION DU PROCÉDÉ *FLOAT* : UNE HISTOIRE RISQUÉE



Alastair PILKINGTON

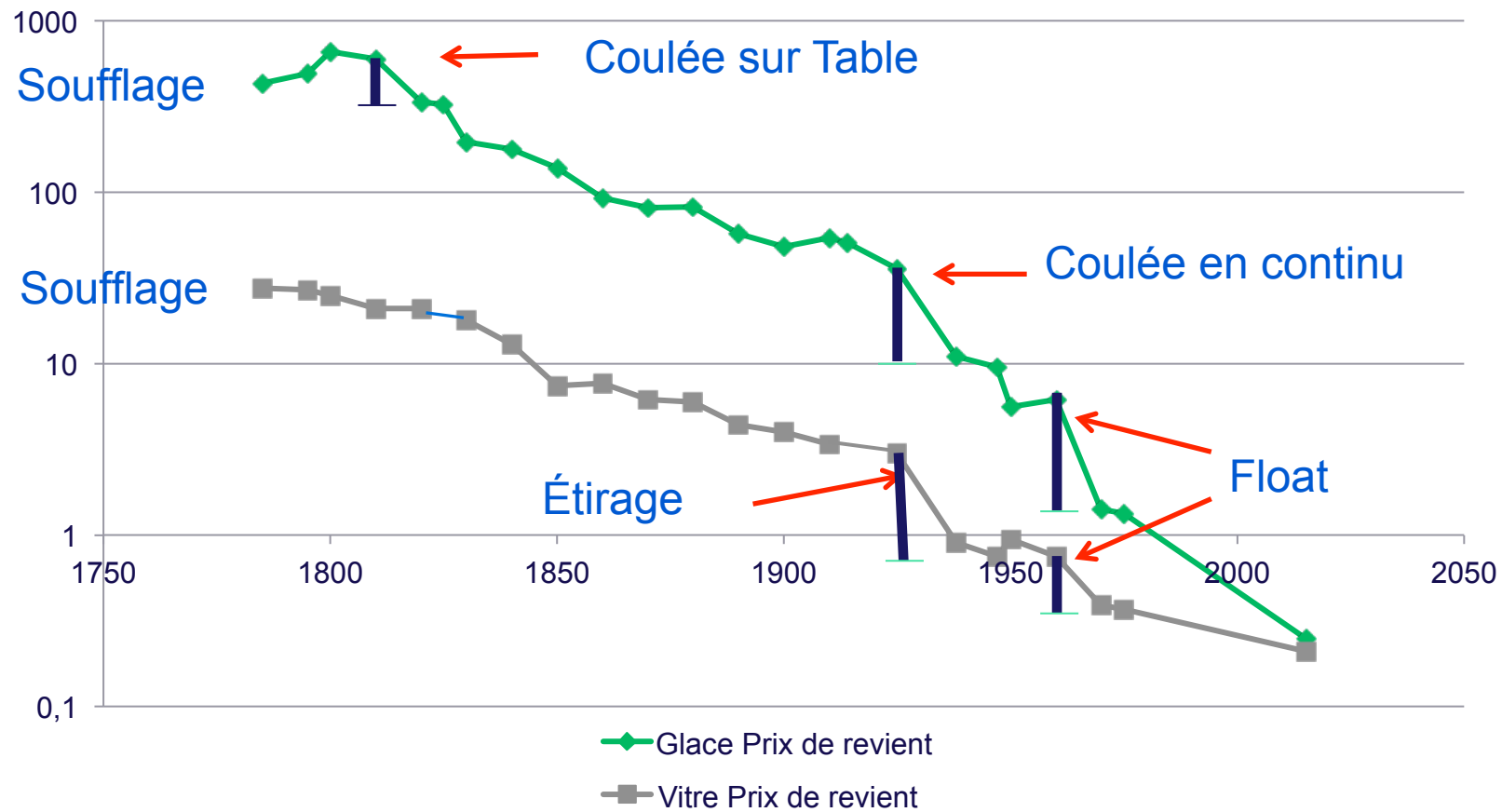
1960

- 1951 : Idée d'effacer les traces des rouleaux en réchauffant le ruban de verre sur un bain d'étain fondu
- Équipe séparée de la R&D centrale
- Idée de déverser directement le verre fondu sur le lit d'étain
- Supprimer l'oxygène (H₂)
- Gérer la convection de la gorge
- Gérer l'épaisseur (6 mm seulement...)
- Coût du premier investissement 3x plus que prévu...

> SUCCÈS EN 1964

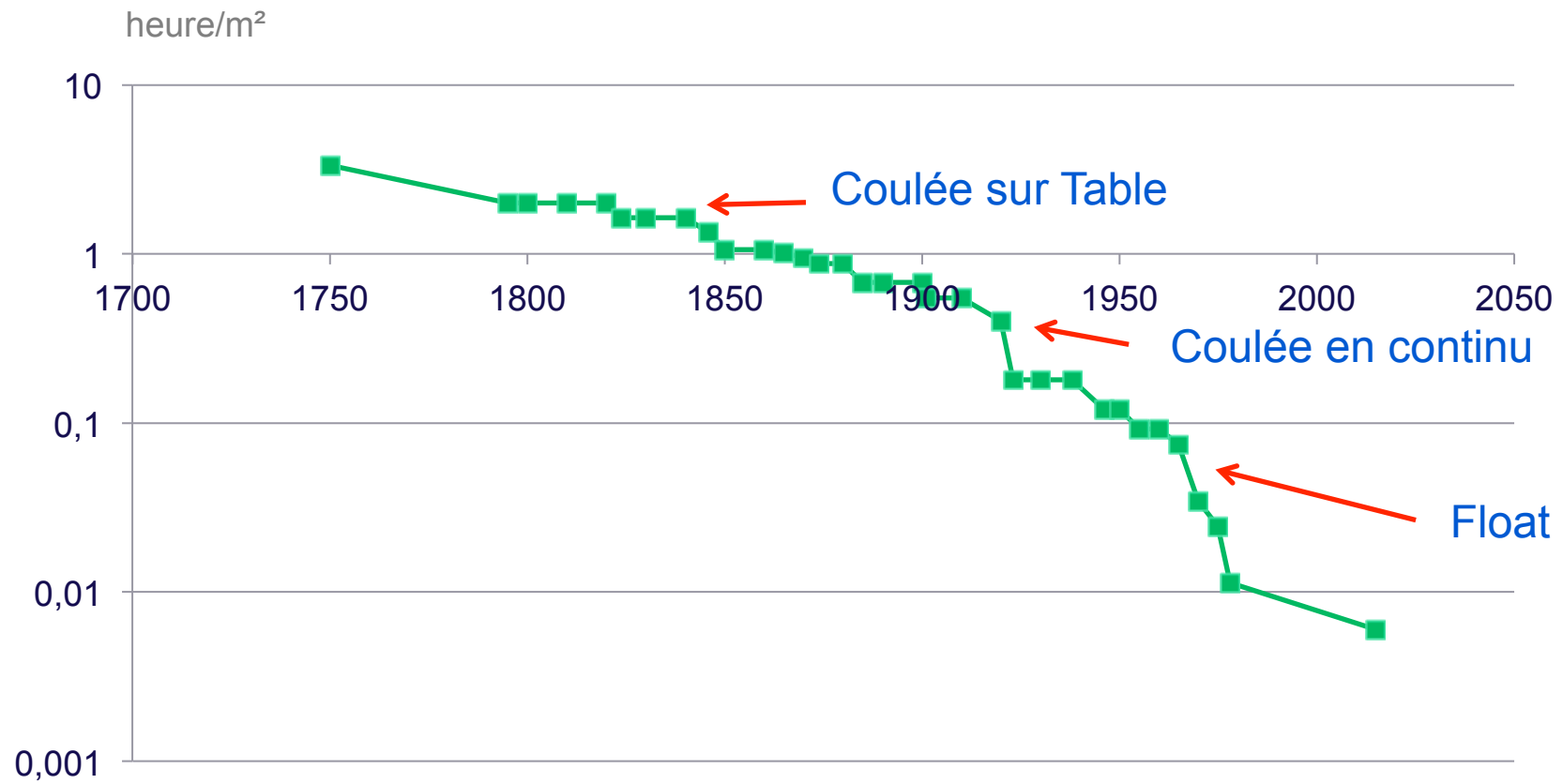
ÉVOLUTION COMPARÉE DU PRIX DE REVIENT DE LA GLACE ET DU VERRE

D'après Mathieu Boaglio, PhD CNAM 1990



NOMBRE D'HEURES DE TRAVAIL

D'après Mathieu Boaglio, PhD CNAM 1990



LE FUSION DRAW, UN VERRE ULTRAMINCE



DU VERRE ... EN ROULEAU



IMPRESSION 3D DU VERRE

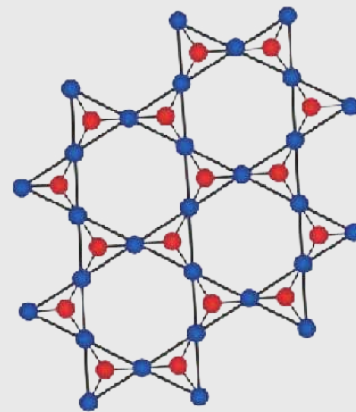


M E D I A T E D M A T T E R

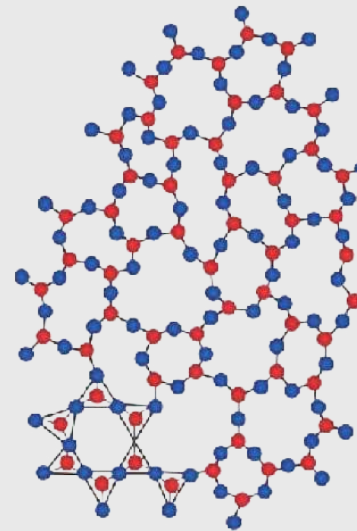


UNE STRUCTURE UNIQUE MAIS NON COMPRISE...

Cristal de SiO₂
(Quartz)



SiO₂ amorphe
(verre)



Extrême robustesse (liaison SiO)
Formable et transparent (structure amorphe)

LA STRUCTURE DU VERRE : UN DÉBAT ENCORE OUVERT...



1

Un liquide
en
surfusion



2

Un nouvel état
de la matière :
entre solide et liquide

LA STRUCTURE DU VERRE : UN DÉBAT ENCORE OUVERT...

**Fifth-order susceptibility unveils growth of thermodynamic
amorphous order in glass-formers**

S. Albert, Th. Bauer, M. Michl, G. Biroli, J.-P. Bouchaud, A. Loidl,
P. Lunkenheimer, R. Tourbot, C. Wiertel-Gasquet and F. Ladieu
(June 9, 2016)

Science **352** (6291), 1308-1311. [doi: 10.1126/science.aaf3182]

REMERCIEMENT
À ANNE ALONZO, AUX ARCHIVES DE SAINT-GOBAIN
[Http://www.Saint-gobain350ans.com](http://www.Saint-gobain350ans.com)



Anne ALONZO



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



Billes DE sciences

<https://www.youtube.com/watch?v=DtXHZ1BWtNg>

