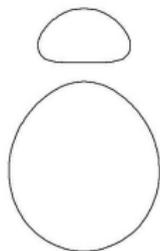
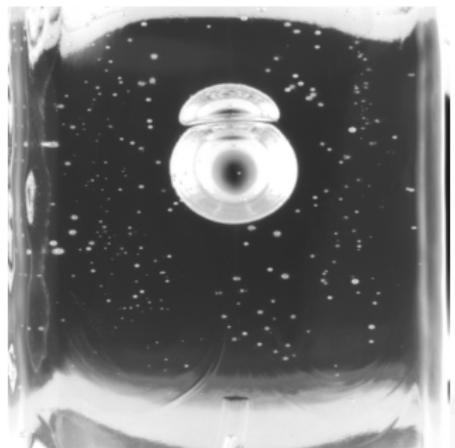


Quelques enjeux scientifiques dans les procédés d'élaboration des verres

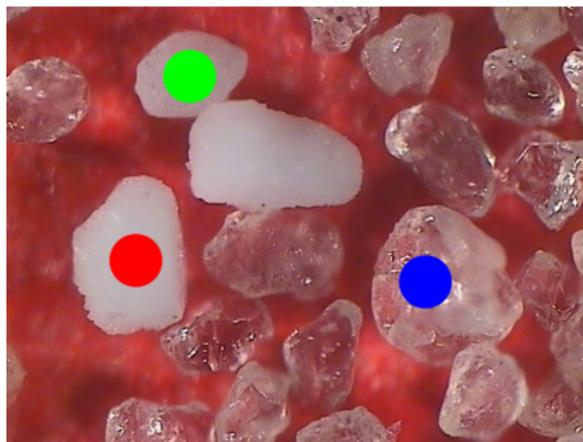
F. Pigeonneau

¹Surface du Verre et Interfaces, UMR 125
CNRS/Saint-Gobain, Aubervilliers




SAINT-GOBAIN

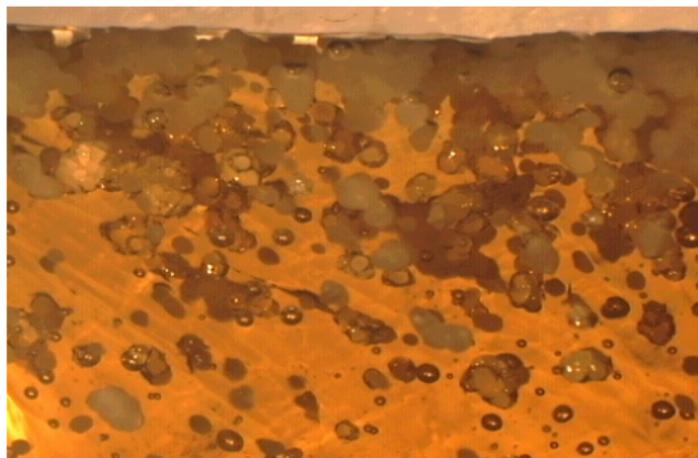
Principe de l'élaboration des verres



- **Silice** : matériau à fondre ($T_f = 1700^\circ \text{C}$) sous forme d'un réseau Si-O.
- **Carbonate de sodium** : formation de liquide à basse température (fondant).
- **Carbonate de calcium** : fixation du Na_2O au réseau Si-O.

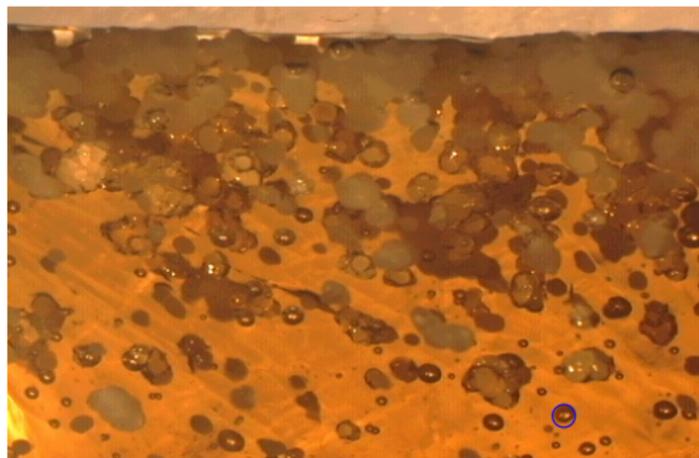
Principe de l'élaboration des verres

Un processus compliqué ...



Principe de l'élaboration des verres

Un processus compliqué ...

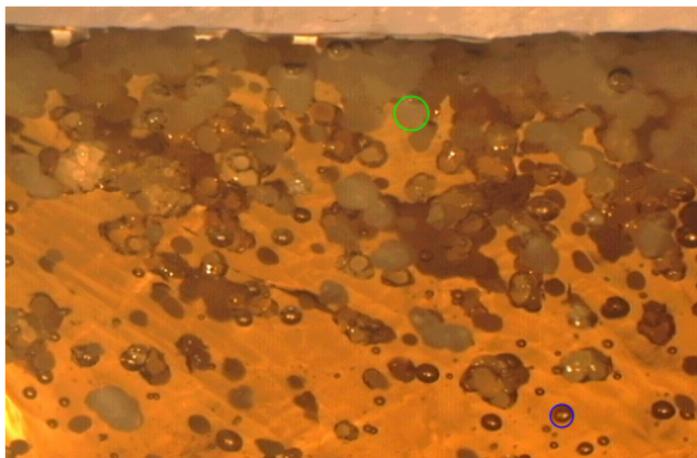


bulles ;

silice
tétraédrique

Principe de l'élaboration des verres

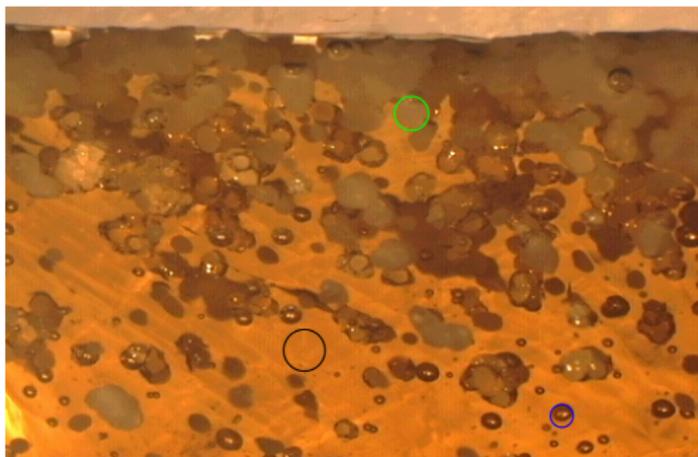
Un processus compliqué ...



bulles ;
infondus de silice ;

Principe de l'élaboration des verres

Un processus compliqué ...



bulles ;
infondus de silice ;
hétérogénéité de composition.

Principe de l'élaboration des verres

Les étapes

1. **Fusion** : faire réagir entre elles les matières premières pour obtenir un silicate fondu. $T \sim 800$ à 1300°C .
2. **Affinage** : élimination des inclusions gazeuses et dissolution des grains de sable. $T \sim 1300$ à 1500°C .
3. **Homogénéisation** : cette étape vise à obtenir un verre qui soit le plus homogène chimiquement et thermiquement.
4. **Conditionnement thermique** : refroidissement du verre pour le préparer à son formage. T de 1500°C à 1000°C .

Fusion d'un verre *in vitro*

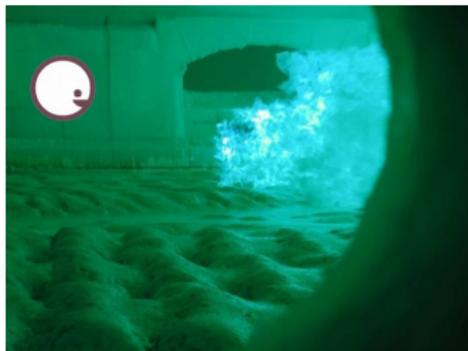
Fours verriers industriels

Un four est un **réacteur chimique**.

- L'énergie nécessaire est de l'ordre de 0,7 kWh/kg.
- Avec les pertes, elle atteint 1,3 kWh/kg voire 2 kWh/kg dans les fours avec beaucoup de mousse.

Elaboration en continu dans une enceinte fermée ($\sim 1600^{\circ}\text{C}$)

(a) Au dessus du tapis de composition



(b) Au dessus du bain de verre

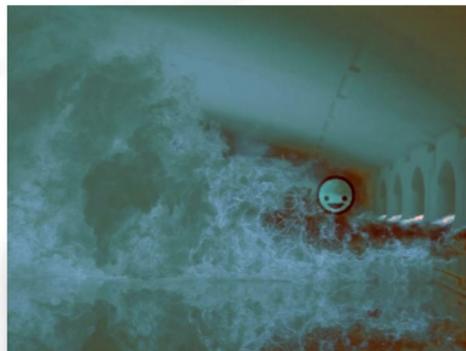


Figure 1: Vue de la chambre de combustion d'un four float.

Enjeux 1 : Combustion et transfert thermique

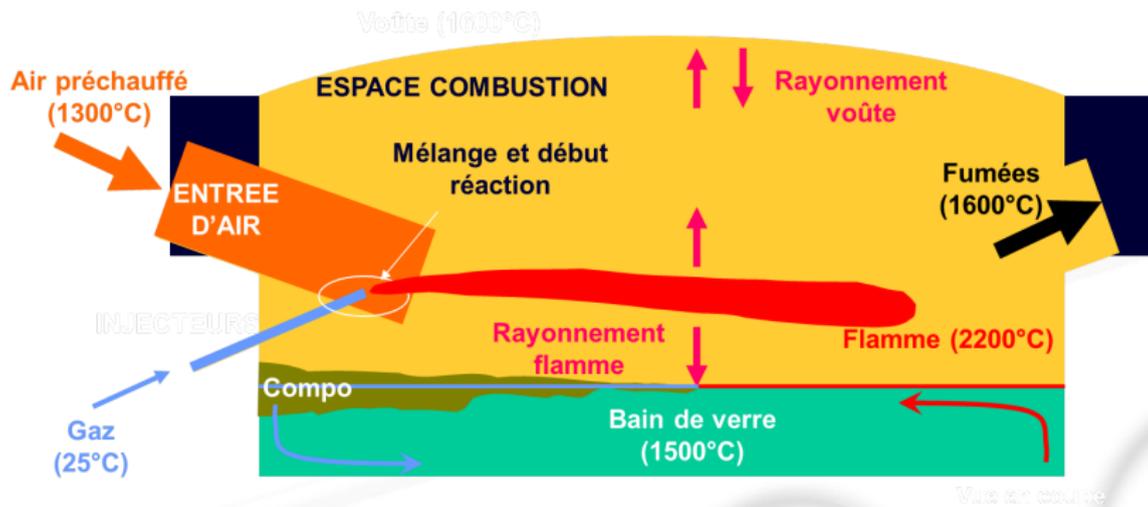


Figure 2: Principe des transferts dans la chambre de combustion.

Enjeux 1 : Combustion et transfert thermique

■ Les particularités de la combustion dans les fours verriers :

- A lieu dans une enceinte fermée ;
- Air fortement préchauffé ;
- Forte dilution due à la recirculation des gaz brûlés.

■ La chambre de combustion doit

- maximiser le transfert thermique à la charge (bain de verre) ;
- minimiser la formation et l'émission des polluants (NO_x , SO_x , ...).

Enjeux 1 : Combustion et transfert thermique

- La modélisation numérique de la chambre est un problème couplé avec des phénomènes tels que:
 - la turbulence ;
 - la combustion à plusieurs phases ;
 - le rayonnement des gaz avec la présence de suie.
- Difficile de trouver des chercheurs qui travaillent sur ces problèmes couplés où l'optimisation du transfert thermique à la charge est primordial.

Enjeux 2 : Élimination des impuretés du verre

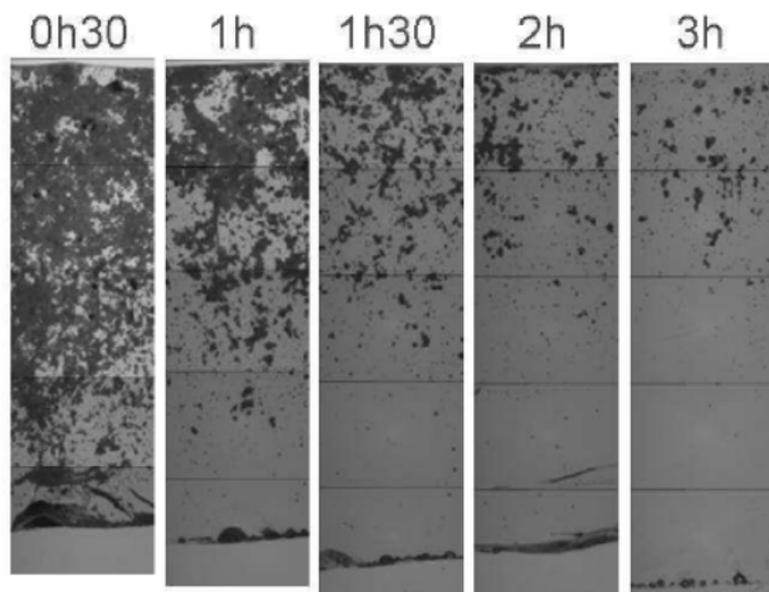


Figure 3: Évolution des impuretés dans le verre au cours du temps.

Enjeux 2 : Élimination des impuretés du verre

- Le nombre d'impuretés évolue de façon exponentielle avec le temps :

$$\frac{dN}{dt} = -k(T)N, \quad (1)$$

$$k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right). \quad (2)$$

Enjeux 2 : Élimination des impuretés du verre

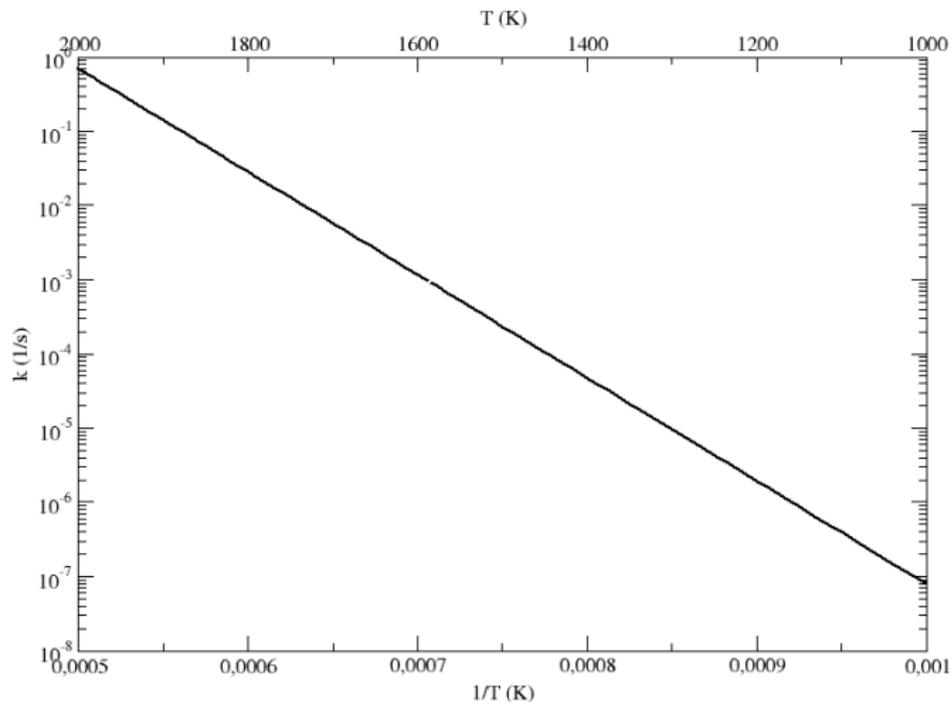


Figure 4: $k(T)$ vs. $1/T$.

Enjeux 2 : Élimination des impuretés du verre

- La réduction du nombre d'impuretés passe par
 - une augmentation de la température ;
 - la nécessité d'avoir un temps de séjour suffisamment grand (2 jours dans un four float, 1 jour dans un four à gorge) ;
 - la réduction de E_A et $k_0 \Rightarrow$ **Développer de nouveaux procédés.**

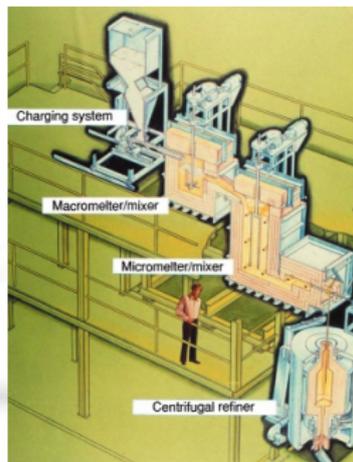


Figure 5: Diagramme du four et de l'affineur rapide (RAMAR) d'Owens-Illinois.

Enjeux 2 : Élimination des impuretés du verre

- La conception des fours repose principalement sur une modélisation numérique thermoconvective :
- Nécessité de développer des outils de simulation performant prenant en compte
 - l'aspect diphasique avec réactions chimiques ;
 - la couplage de la diffusion des gaz avec celles des cations ;
 - le couplage du transfert thermique par rayonnement et la dispersion due aux bulles ;
 - l'apparition de mousse à la surface du verre.

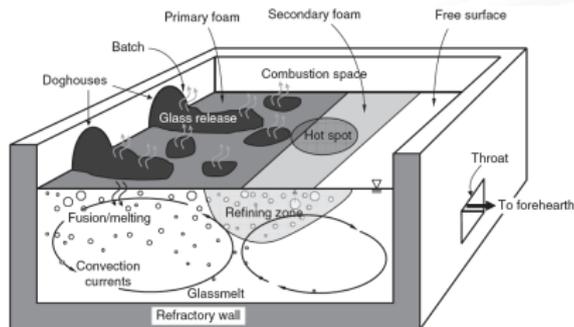


Figure 6: Élaboration des verres en four à gorge.

Pour conclure

- Le développement de procédés innovants passe par
 - une connaissance approfondie des phénomènes physicochimiques ;
 - une prise en compte de ces phénomènes couplés ;
 - le développement d'outils numériques performants.
- A SVI, divers sujets sont en cours ou en projet :

(a) Fusion de verre recyclé



(b) Coalescence de bulles



Figure 7: Création de microbulles dans des verres en fusion.