



Webinaire TT1.5 # 9, 21 mars 2024

## La fabrication du verre face aux enjeux écologiques

Franck Pigeonneau

## 1. Le verre

### 1.1 Une longue histoire

### 1.2 Propriétés essentielles

## 2. Production industriel du verre

## 3. Enjeux écologiques

### 3.1 Émissions CO<sub>2</sub>

### 3.2 Trajectoires de la décarbonation

## 4. Synthèse

# 1. Le verre

## 1.1 Une longue histoire

Le mot « **verre** » vient du Latin « **vitrum** » signifiant clarté. Le mot anglais “**glass**” dérive également du Latin « **glæsum** » qui signifie transparence.

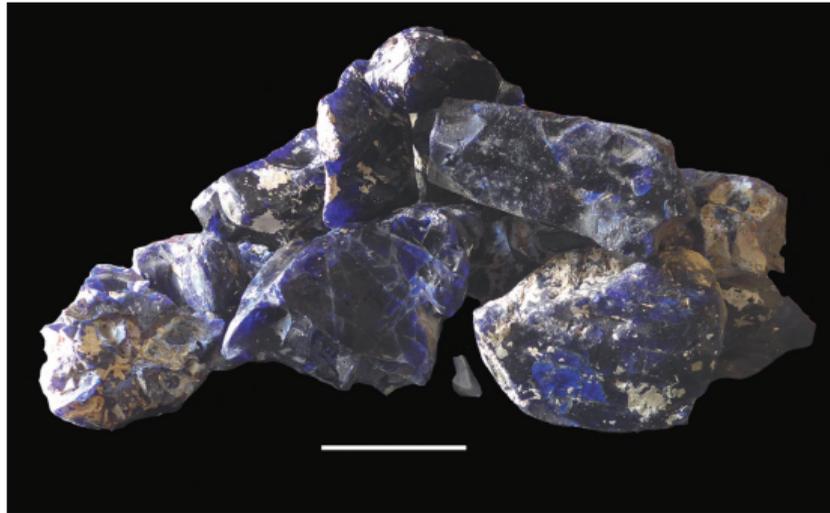


Figure 1 – Verre romain (300 ans avant J.C., Corse)<sup>1</sup>.

---

1. P. Richet (éd.) : Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture, Volume II, First Edition. Pascal Richet, 1st, 2021.

# 1. Le verre

## 1.1 Une longue histoire

Le verre existe à l'état naturel :

(a)



(b)



Figure 2 – (a) Verre basaltique suite des éruptions volcaniques (Kilauea, Hawaii), (b) Outils préhistoriques en obsidienne.

# 1. Le verre

## 1.1 Une longue histoire

Le verre aurait été pour la première fois élaboré par des voyageurs phéniciens selon Pline l'Ancien.



Figure 3 – Création du verre selon Pline l'Ancien, ~3000 ans avant J.C.

# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles

# Transparence

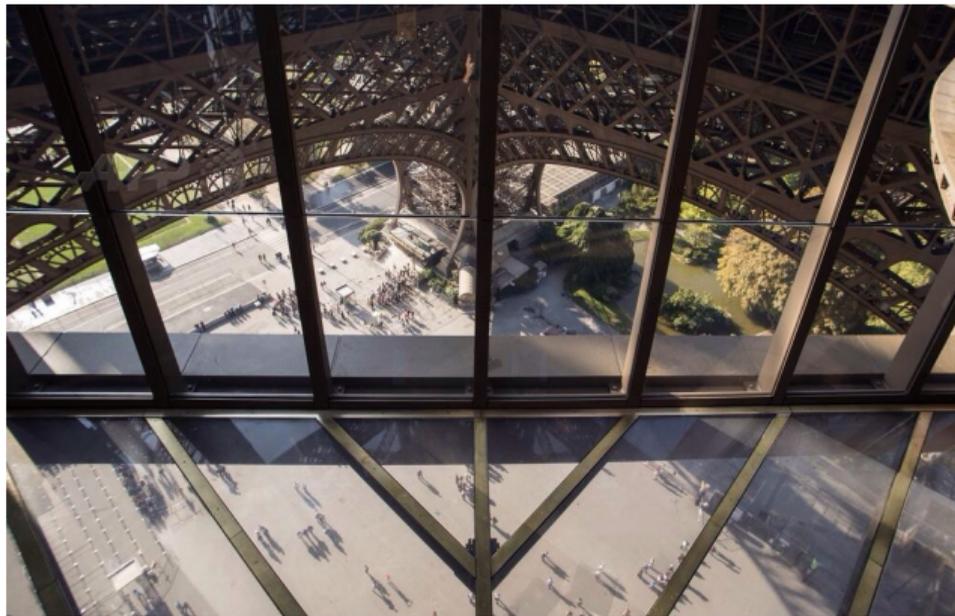


Figure 4 – Plancher du premier étage de la tour Eiffel [L. Bonaventure, AFP].

# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles

7

# Mise en forme facile

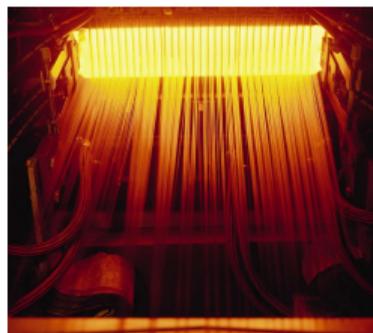
(a) verre creux



(b) verre plat



(c) fibre de renforcement



(d) fibre d'isolation



# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles

8

# Rigidité mécanique

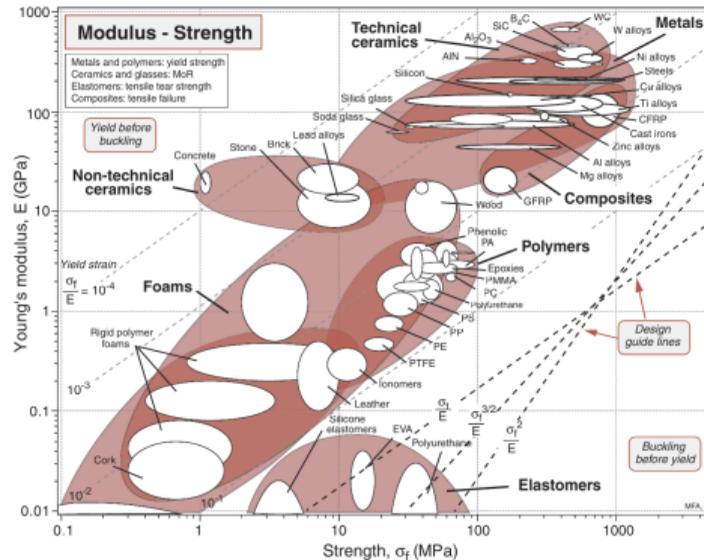


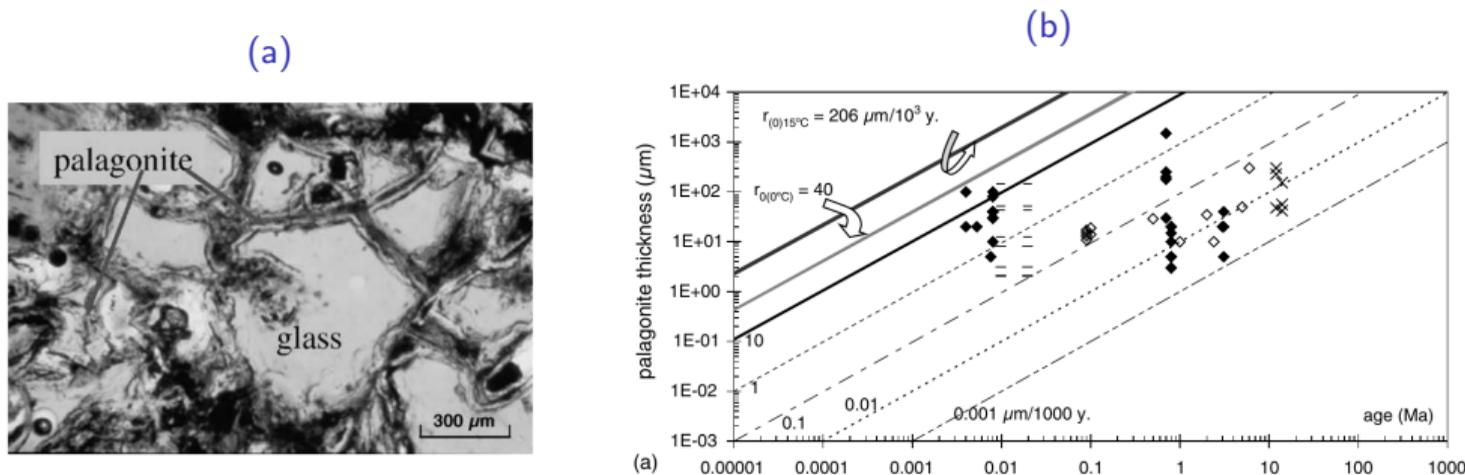
Figure 6 –  $E$  vs.  $\sigma_f$  pour une large gamme de matériaux selon Ashby<sup>2</sup>.

# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles

9

# Durabilité chimique



3. J.-L. Crovisier/T. Advocat/J.-L. Dussossoy : Nature and role of natural alteration gels formed on the surface of ancient volcanic glasses (Natural analogs of waste containment glasses), in : *J. Nucl. Mater.* 321 (2003), p. 91-109

# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles

# Recyclable à $\infty$

(a)



(b)



Figure 8 – (a) Verre réutilisé pour l'élaboration, (b) Projet européen "Close the glass loop" promouvant le recyclage du verre.

# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles



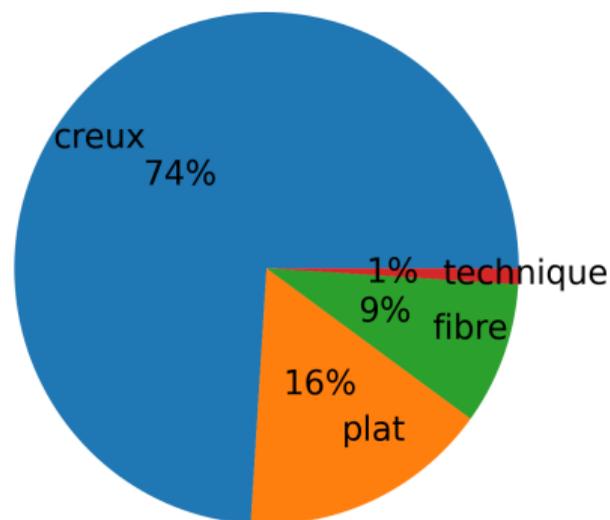
# 1. Le verre

## 1.2 Propriétés essentielles



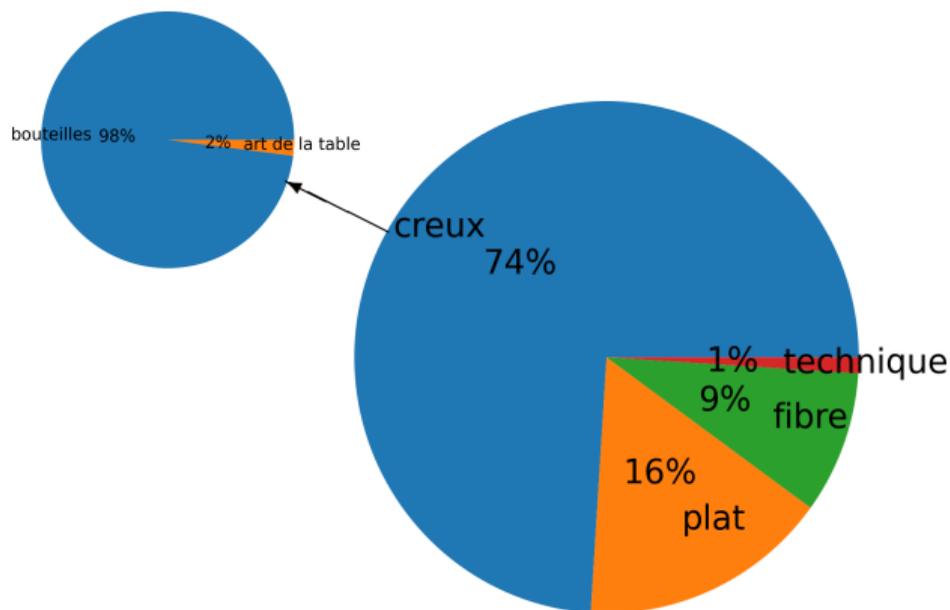
## 2. Production industriel du verre

- ▶ La France a produit 5,2 Mt en 2016.



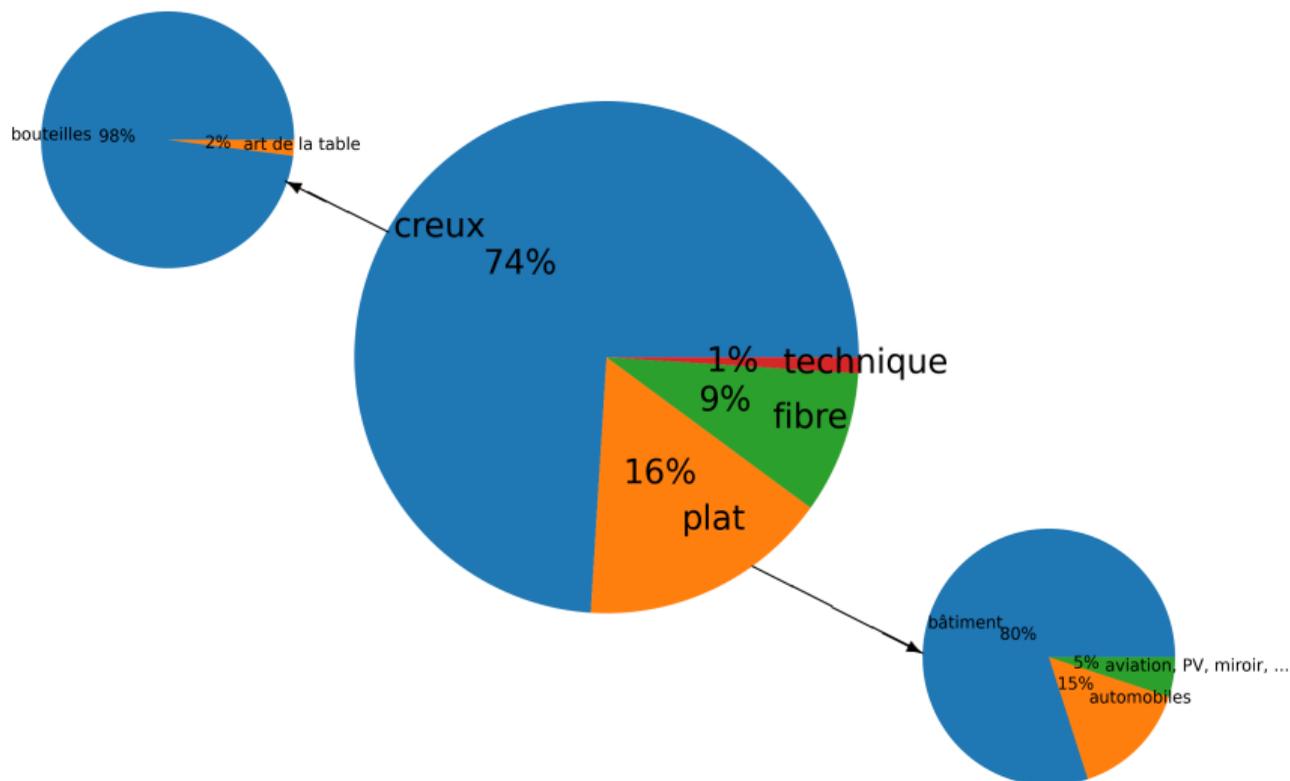
## 2. Production industriel du verre

- ▶ La France a produit 5,2 Mt en 2016.



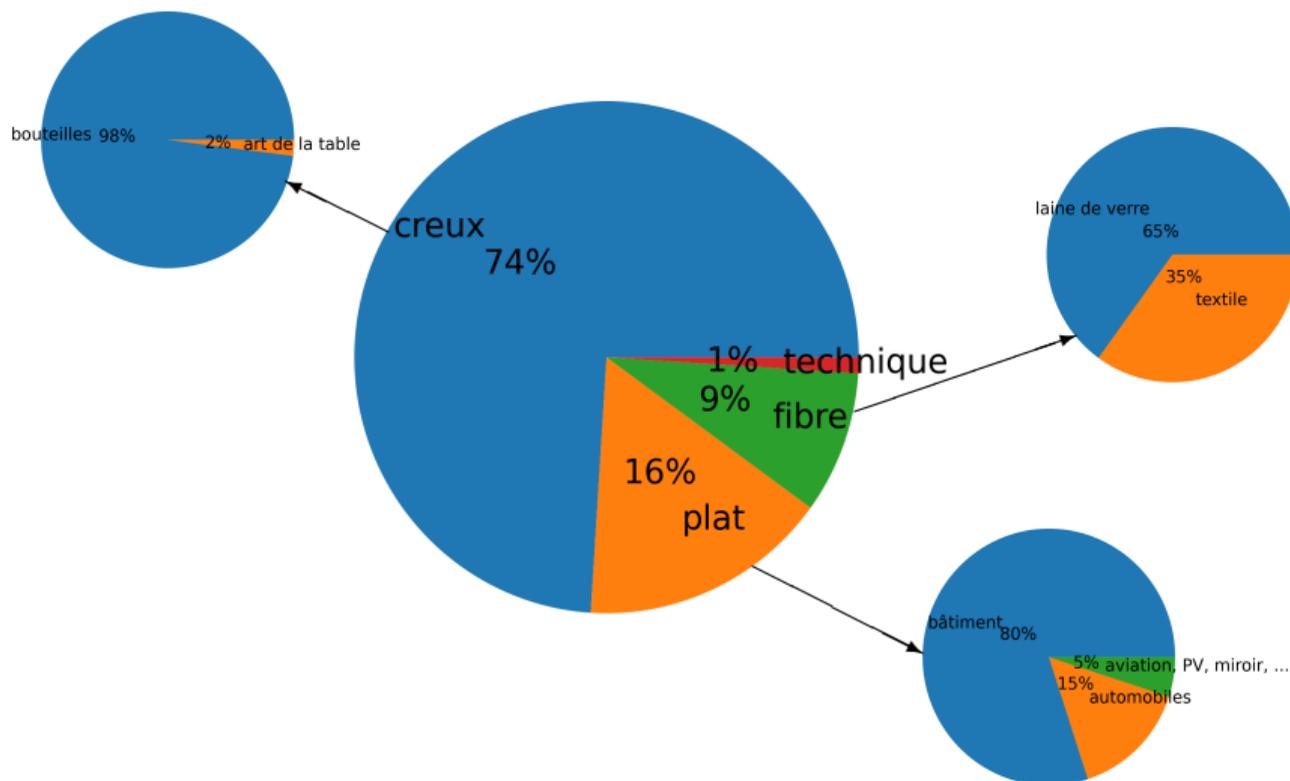
## 2. Production industriel du verre

- ▶ La France a produit 5,2 Mt en 2016.



## 2. Production industriel du verre

► La France a produit 5,2 Mt en 2016.



## 2. Production industriel du verre

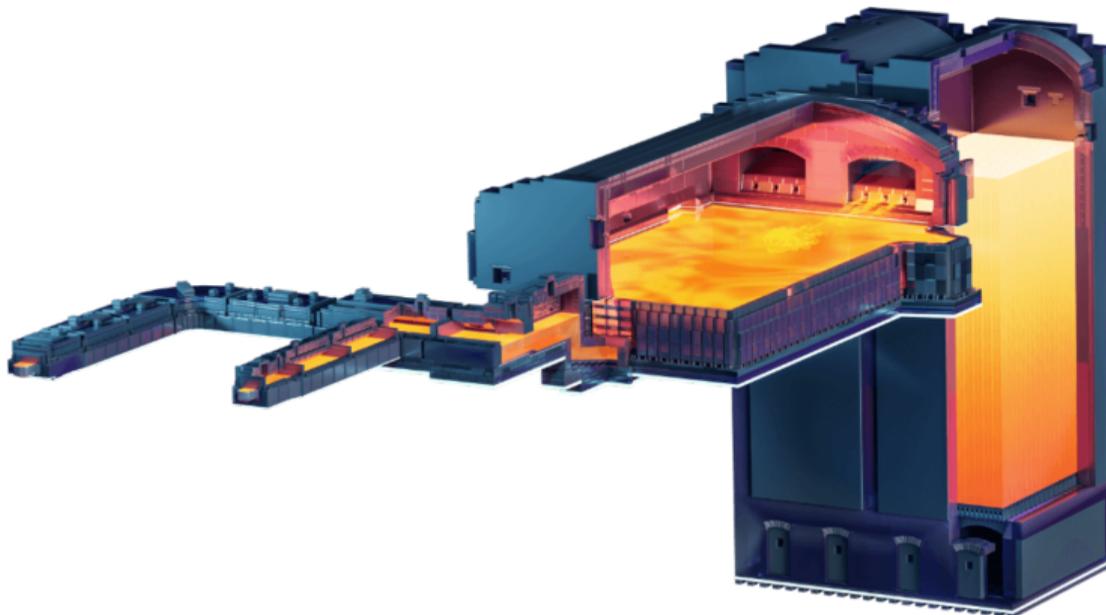
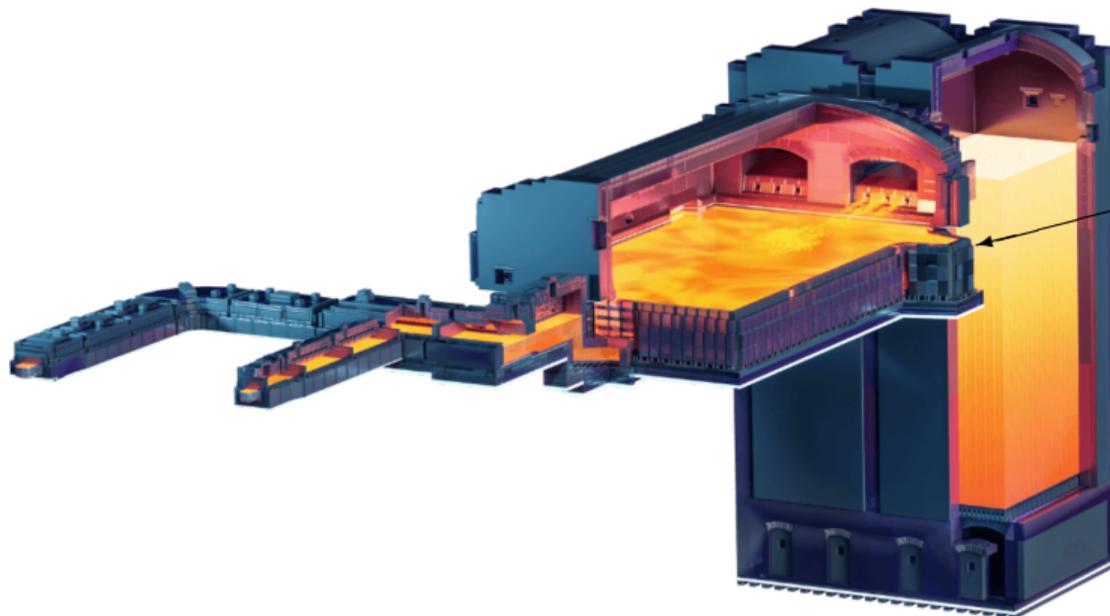


Image ForGlass®

## 2. Production industriel du verre

13



Matières premières

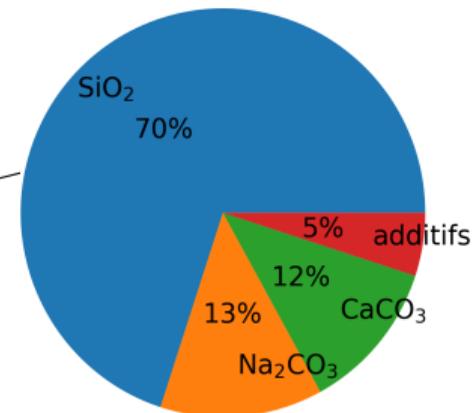
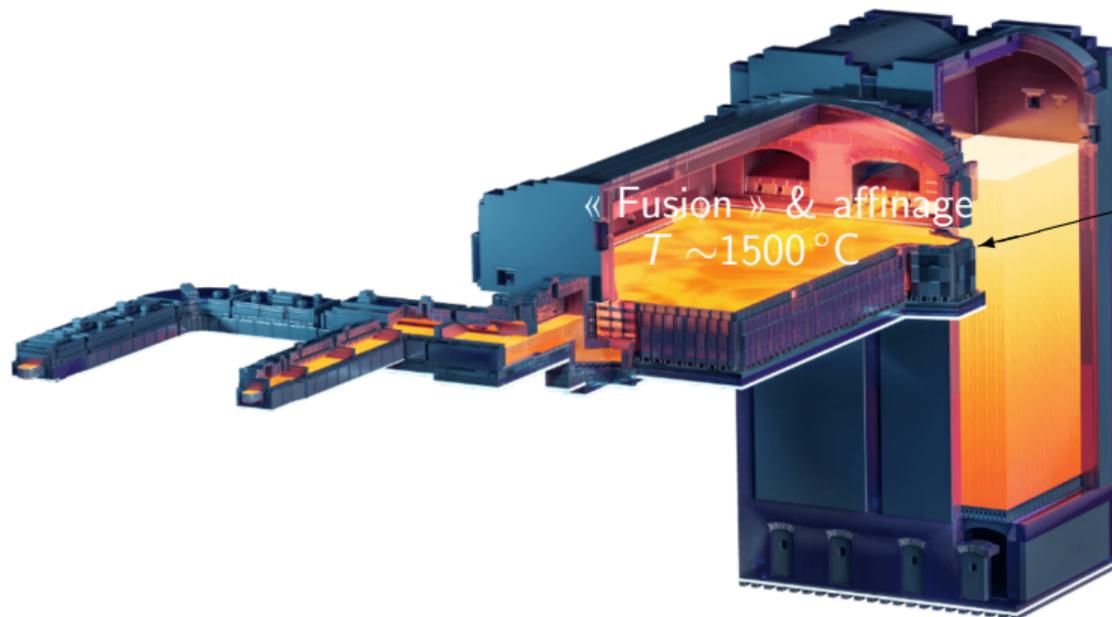


Image ForGlass®

## 2. Production industriel du verre

13



Matières premières

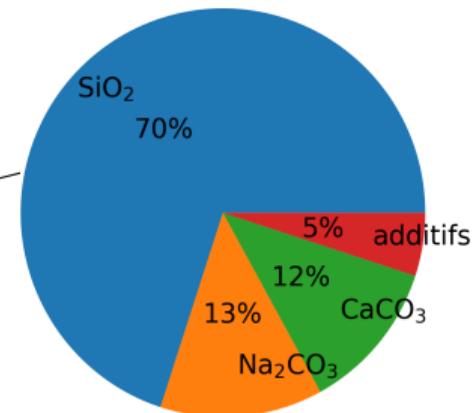
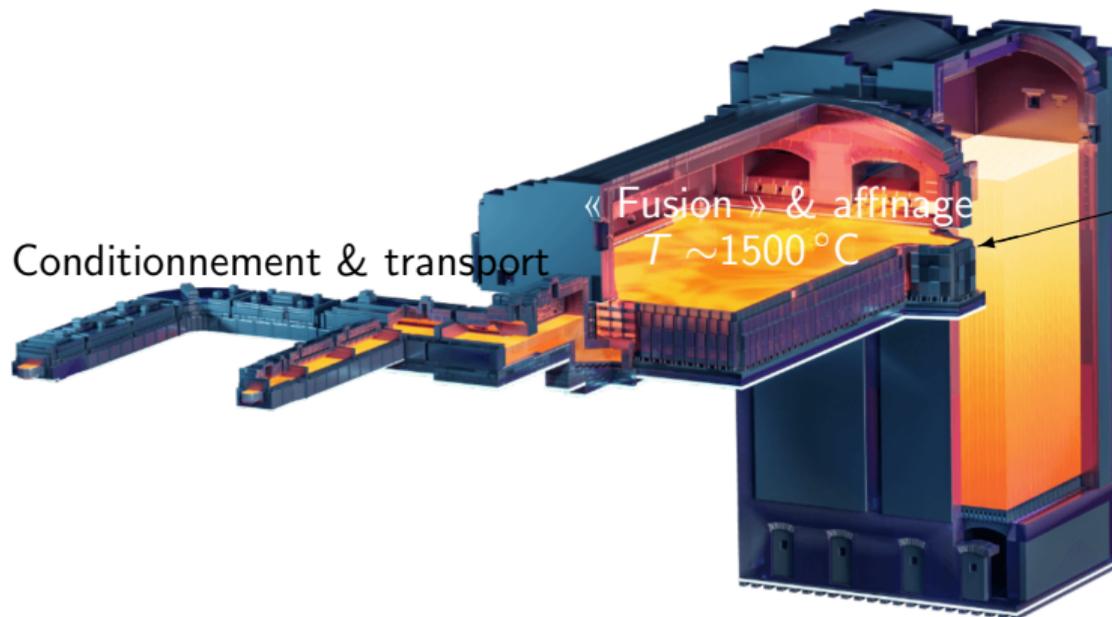


Image ForGlass®

## 2. Production industriel du verre

13



Matières premières

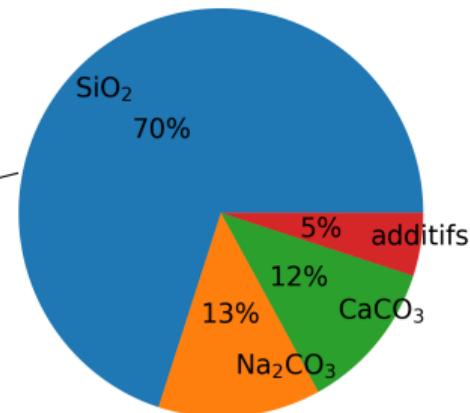
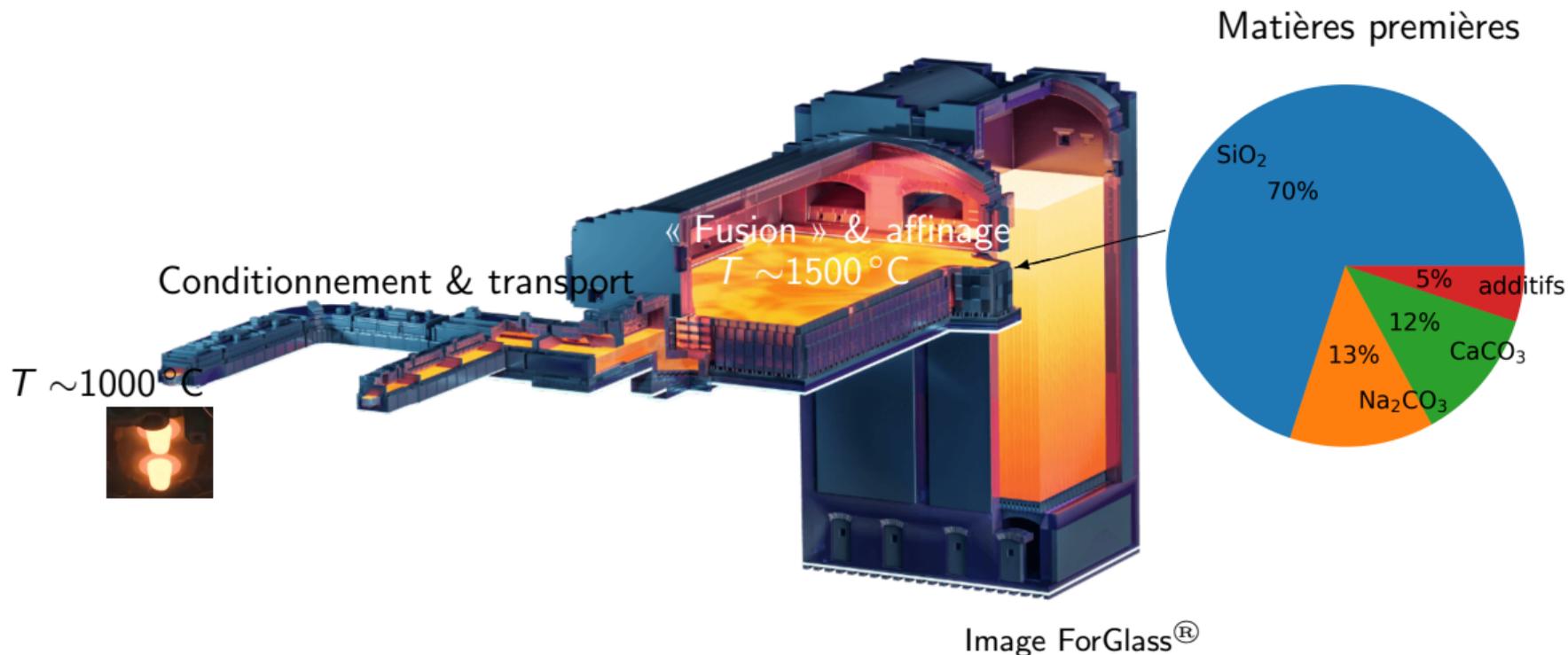


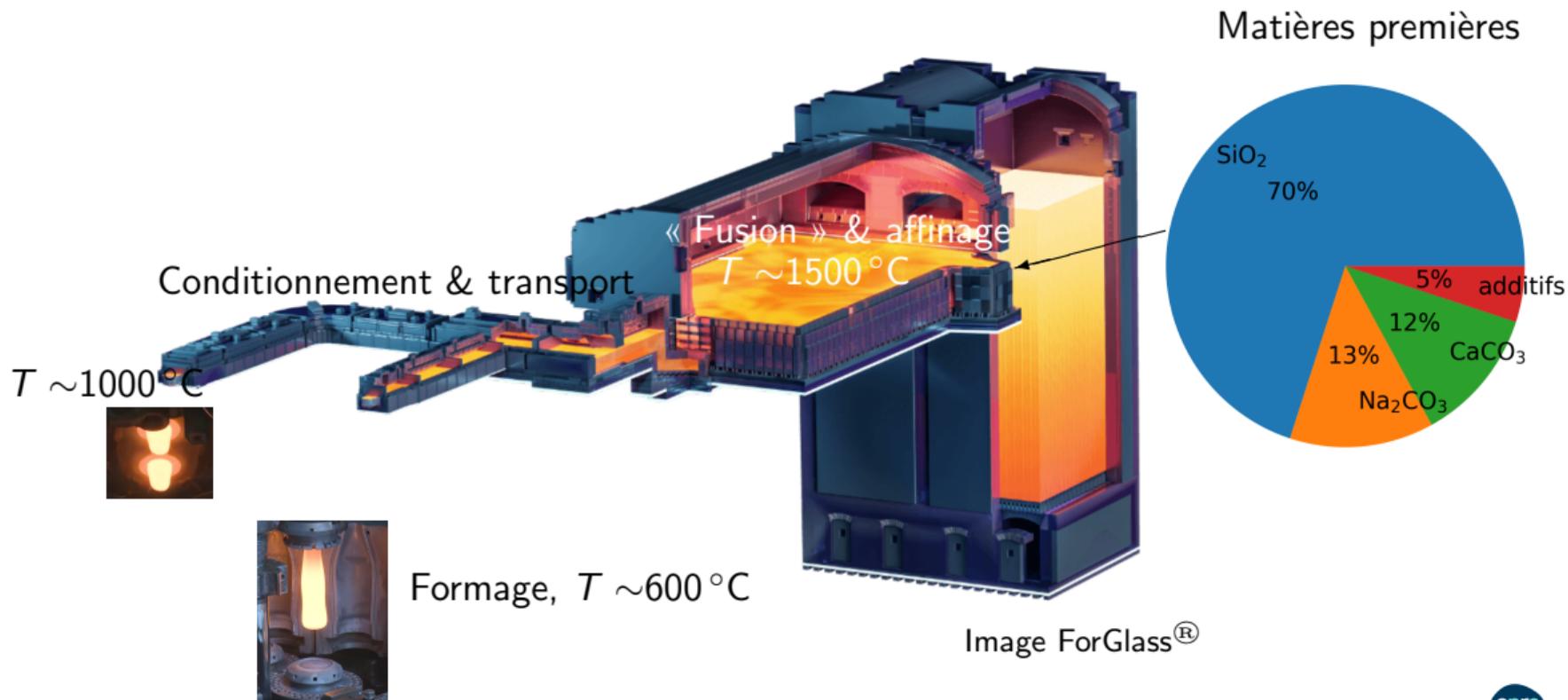
Image ForGlass<sup>®</sup>

## 2. Production industriel du verre

13



## 2. Production industriel du verre



## 2. Production industriel du verre

14

Un four est un **réacteur chimique** et un **échangeur de chaleur**.

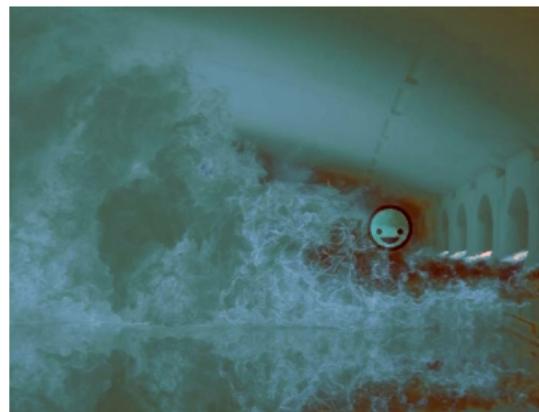
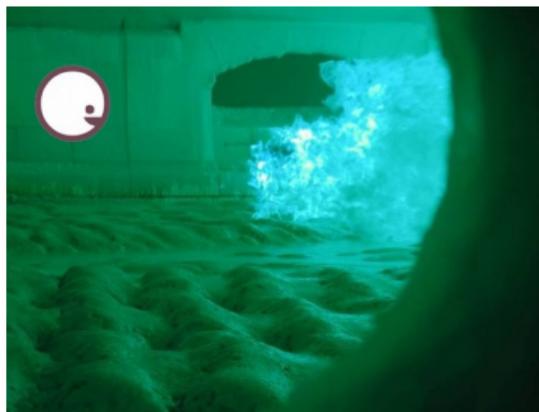


Figure 9 – Vue à l'intérieur d'un four « float » [images Saint-Gobain Recherche, Paris].

- ▶ L'énergie nécessaire  $\sim 1$  à  $2 \text{ MW h t}^{-1}$  est soit :
  - ▶ **fossile** : fioul, gaz naturel ;
  - ▶ **électrique** : dissipation par effet Joule dans le bain liquide.

## 2. Production industriel du verre

15

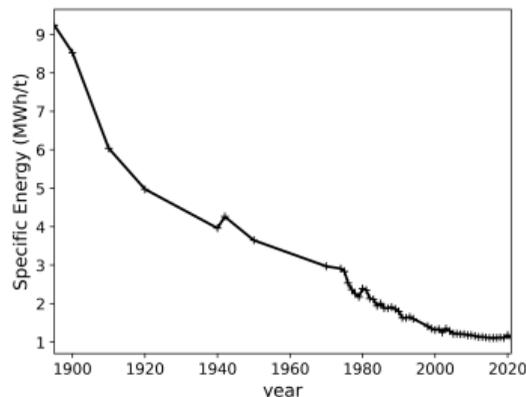


Figure 10 – Énergie spécifique vs. année.

	verre plat	verre creux	fibre de verre
Combustion	2,1 MW h t <sup>-1</sup>	1,7 MW h t <sup>-1</sup>	1,5 MW h t <sup>-1</sup>
électrique	0,5 MW h t <sup>-1</sup>	0,5 MW h t <sup>-1</sup>	1,7 MW h t <sup>-1</sup>

Table 1 – Consommation d'énergie spécifique par source et par type de verre<sup>4</sup>.

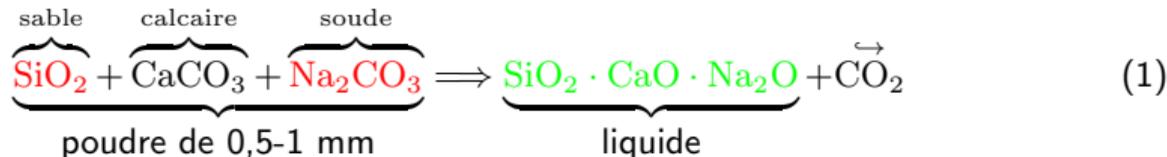
4. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière, 2021, [url](#) :

# 3. Enjeux écologiques

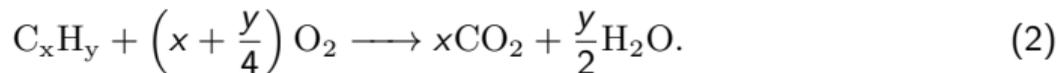
16

## 3.1 Émissions CO<sub>2</sub>

- ▶ Selon le rapport Citepa<sup>5</sup> :
  - ▶ Émissions nat. (2021) : 418 MtCO<sub>2</sub>éq.
  - ▶ Émissions indus. : 77,8 MtCO<sub>2</sub>éq.
  - ▶ Émissions indus. verrière : 2,7 MtCO<sub>2</sub>éq. ➡ 0,6 % des émissions nat. ; 3,3 % des émissions indus.
- ▶ Origines des émissions verrières :
  - ▶ Décarbonatation des matières premières (20 %) :



- ▶ Combustibles fossiles (80 %) :



5. Citepa : Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022, rapp. tech., Secten, 2023, url : [https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/2023/Citepa\\_Secten\\_ed2023\\_v1.pdf](https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/2023/Citepa_Secten_ed2023_v1.pdf)

# 3. Enjeux écologiques

## 3.1 Émissions CO<sub>2</sub>

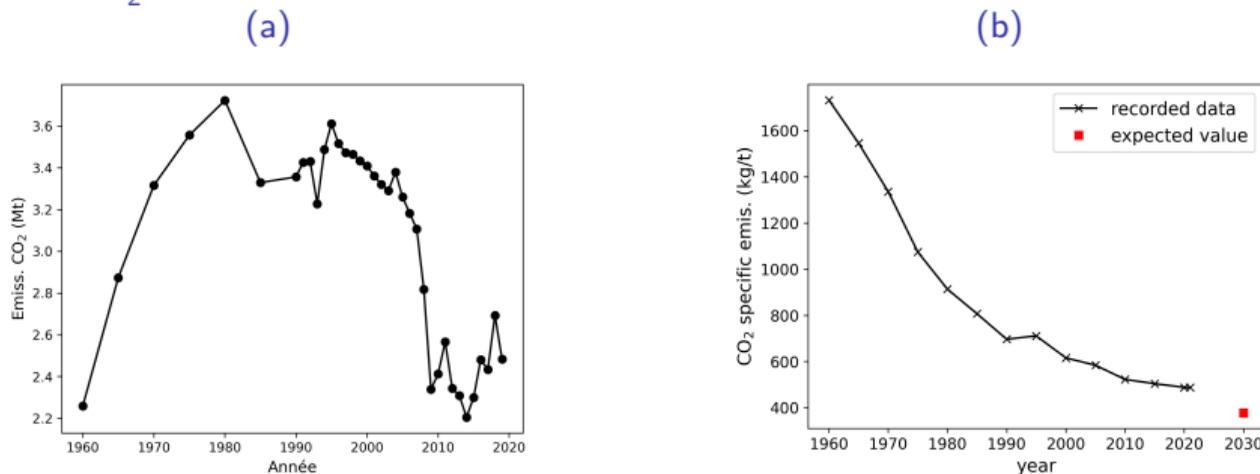


Figure 11 – Historique des émissions de CO<sub>2</sub> (indus. verre, Fr) : (a) totale et (b) spécifique.

verre plat	verre creux	fibre de verre
590 kg t <sup>-1</sup>	440 kg t <sup>-1</sup>	500 kg t <sup>-1</sup>

Table 2 – Émissions spécifiques de CO<sub>2</sub> par type de verre<sup>6</sup>.

6. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 4).  
 Cette présentation a été réalisée le 21 mars 2024 pour le Webinaire TTI.1 #9, proposé par The Transition Institute 1.5 - Mines Paris - PSL

### 3. Enjeux écologiques

#### 3.2 Trajectoires de la décarbonation

- ▶ 1 t de « calcin » dans un four :
  - ▶ 300 kg de CO<sub>2</sub> en moins ;
  - ▶ 200 kg de CO<sub>2</sub> en moins dans la synthèse du Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et extraction en carrière ;
  - ▶ 10 % de calcin ➡ 3 % de réduction de consommation d'énergie ;
  - ▶ En France, 82 % du verre est recyclé.

	verre plat	verre creux	fibres de verre
Durée de vie	12 ans	<b>1 utilisation</b>	30 ans
Taux de calcin (four)	20 %	65 %	40 %
Taux de collecte	4 %	78 %	3 %
Resp. élargie prod. (REP)	✓ (2006)	✓ (1993)	en cours (loi EC 2020)

Table 3 – Recyclage du verre en fonction des types de verre.

# 3. Enjeux écologiques

## 3.2 Trajectoires de la décarbonation

19

<b>Recyclage</b>	Mature sur les verres d'emballage, en développement pour les autres verres
<b>Efficacité énergétique</b>	Optimisation des fours, préchauffage des matières premières ; récupération de la chaleur fatale, oxy-combustion
<b>Électrification des procédés</b>	A développer sur les fours de grande capacité ( $>200 \text{ t d}^{-1}$ )
<b>Utilisation des bio-gaz</b>	Simple à mettre en œuvre et ressource locale
<b>Utilisation H<sub>2</sub></b>	Conception des fours à revoir et accès à la ressource
<b>Capture et stockage CO<sub>2</sub></b>	Développement possible sur les technologies oxy-combustion

Table 4 – Leviers technologiques et tendances technico-économiques<sup>7</sup>.

7. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 4).

# 3. Enjeux écologiques

## 3.2 Trajectoires de la décarbonation

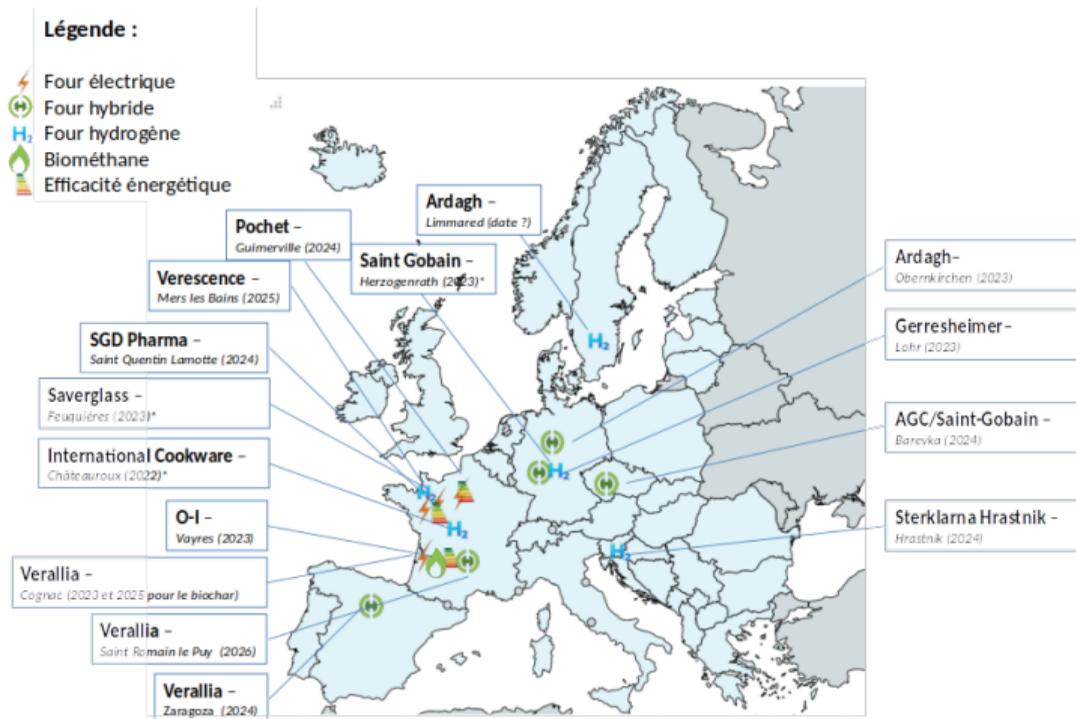


Figure 12 – Projets verre bas carbone recensés en oct. 2023 [X. Capilla, Institut du Verre].

## 4. Synthèse

21

	2030	2050
Ambitieux	1,58 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,2 MtCO <sub>2</sub> éq.
Central	1,89 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,30 MtCO <sub>2</sub> éq.
Tendancier	2,11 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,52 MtCO <sub>2</sub> éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO<sub>2</sub>éq.<sup>8</sup>.

---

8. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 4).

## 4. Synthèse

21

	2030	2050
Ambitieux	1,58 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,2 MtCO <sub>2</sub> éq.
Central	1,89 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,30 MtCO <sub>2</sub> éq.
Tendancier	2,11 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,52 MtCO <sub>2</sub> éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO<sub>2</sub>éq.<sup>8</sup>.

► **Bonnes pratiques :**

- Transparence sur l’empreinte CO<sub>2</sub> des produits et incitation aux usages optimaux ;
- Éco-conception : démantèlement et réemploi avant recyclage.

---

8. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 4).

## 4. Synthèse

21

	2030	2050
Ambitieux	1,58 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,2 MtCO <sub>2</sub> éq.
Central	1,89 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,30 MtCO <sub>2</sub> éq.
Tendanciel	2,11 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,52 MtCO <sub>2</sub> éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO<sub>2</sub>éq.<sup>8</sup>.

▶ **Bonnes pratiques :**

- ▶ Transparence sur l’empreinte CO<sub>2</sub> des produits et incitation aux usages optimaux ;
- ▶ Éco-conception : démantèlement et réemploi avant recyclage.

▶ **Réglementation :**

- ▶ Renforcement des REP ;
- ▶ Prix du carbone ;
- ▶ Favoriser l’innovation et les essais industriels.

---

8. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 4).

## 4. Synthèse

21

	2030	2050
Ambitieux	1,58 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,2 MtCO <sub>2</sub> éq.
Central	1,89 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,30 MtCO <sub>2</sub> éq.
Tendancier	2,11 MtCO <sub>2</sub> éq.	0,52 MtCO <sub>2</sub> éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO<sub>2</sub>éq.<sup>8</sup>.

### ► **Bonnes pratiques :**

- Transparence sur l’empreinte CO<sub>2</sub> des produits et incitation aux usages optimaux ;
- Éco-conception : démantèlement et réemploi avant recyclage.

### ► **Réglementation :**

- Renforcement des REP ;
- Prix du carbone ;
- Favoriser l’innovation et les essais industriels.

### ► **Soutien financier :**

- Développements des infrastructures (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, électricité, bio-gaz) ;
- Soutien à l’innovation et à la R&D (nouvelles compositions, nouveaux concepts de fours).

---

8. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 4).

**Merci de votre attention !**

## Merci de votre attention !

- ▶ A. Berthereau (Owens-Illinois) ;
- ▶ X. Capilla (Institut du verre) ;
- ▶ Jean-Marc Flesselles (Saint-Gobain Isover) ;
- ▶ C. Payen (Verallia) ;
- ▶ E. Guillard (Saint-Gobain Recherche, Paris) ;
- ▶ R. Guilbaut (Pochet) ;