



Webinaire TTI.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 CO₂

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.

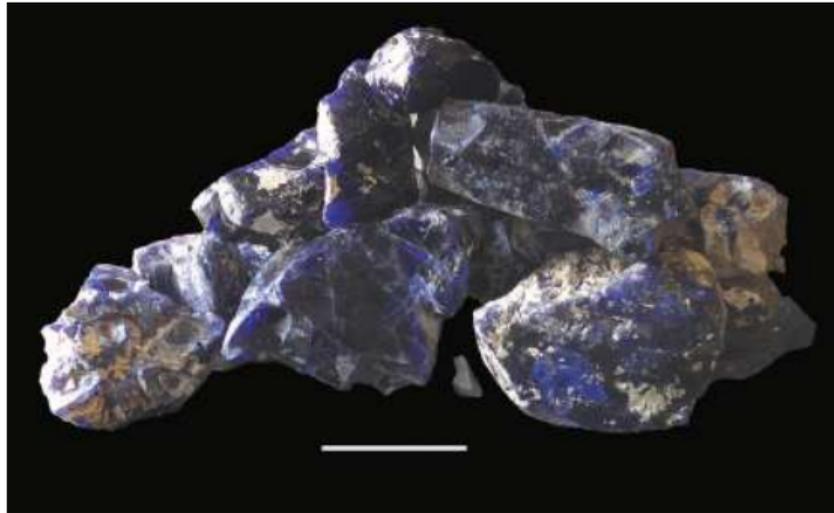


Figure 1 – Verre romain (300 ans avant J.C., Corse)¹.

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

6

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

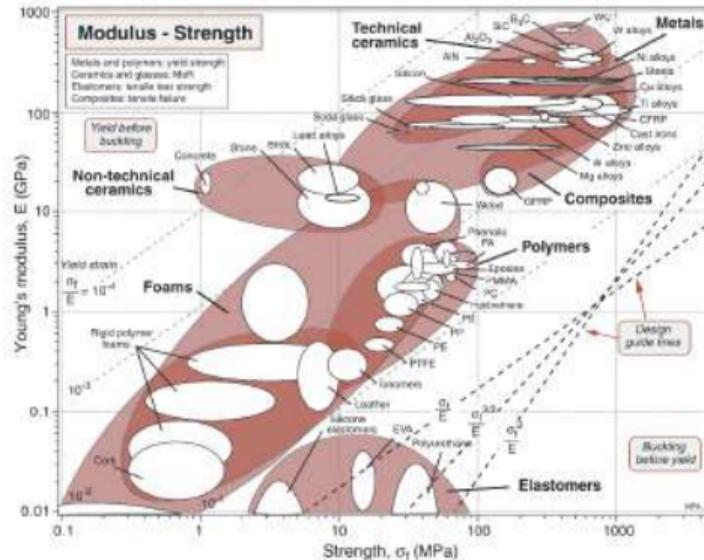


Figure 6 – E vs. σ_f pour une large gamme de matériaux selon Ashby².

1. Le verre

1.2 Propriétés essentielles

Durabilité chimique

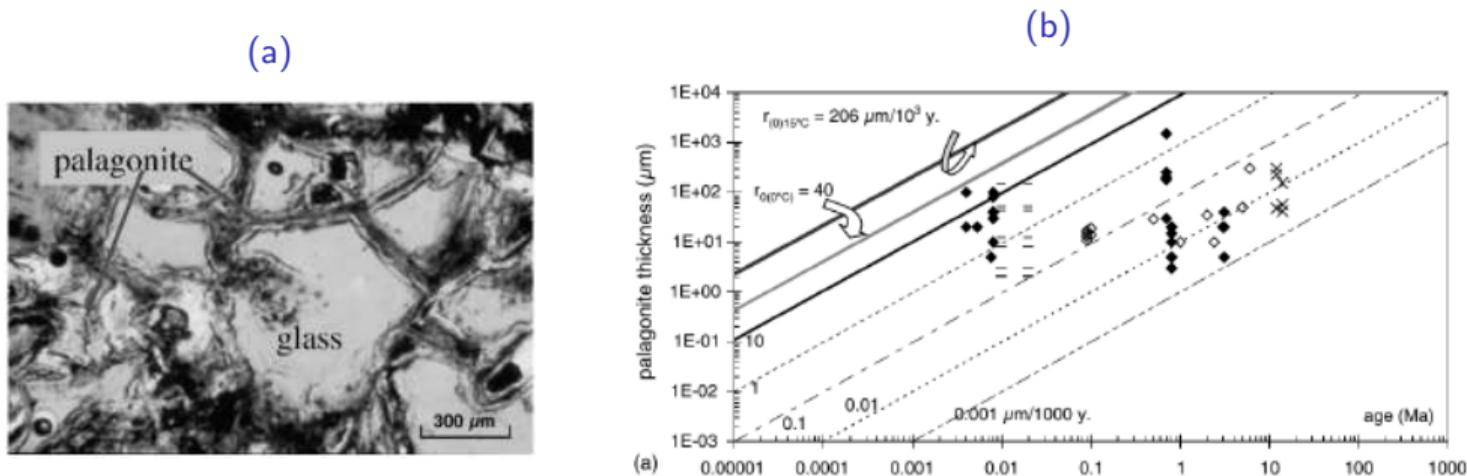


Figure 7 – (a) Verre islandais de 90000 ans, (b) épaisseur altéré vs. M années selon ³.

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 ∞

(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

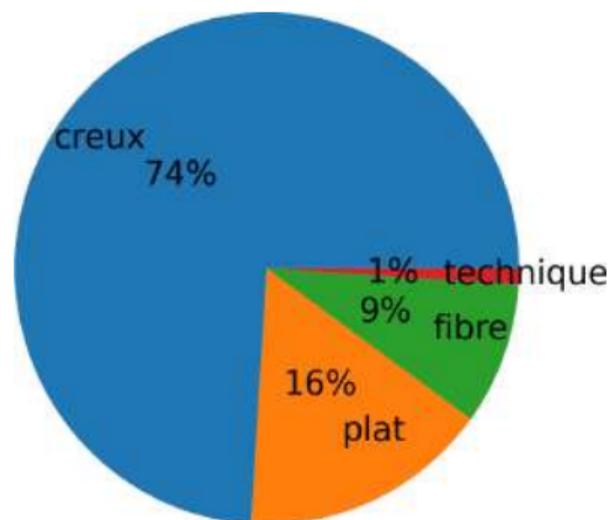
1.2 Propriétés essentielles



2. Production industriel du verre

12

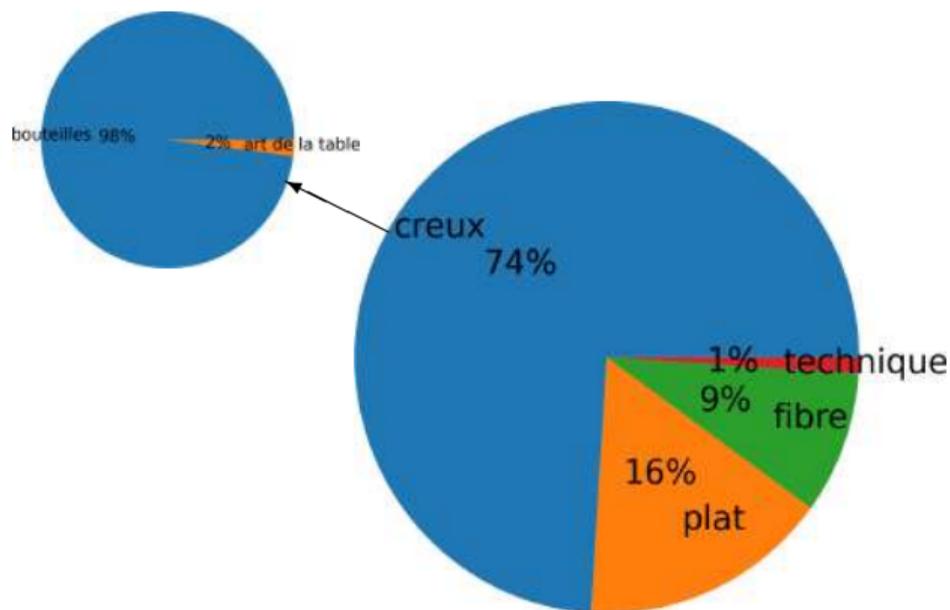
- ▶ La France a produit 5,2 Mt en 2016.



2. Production industriel du verre

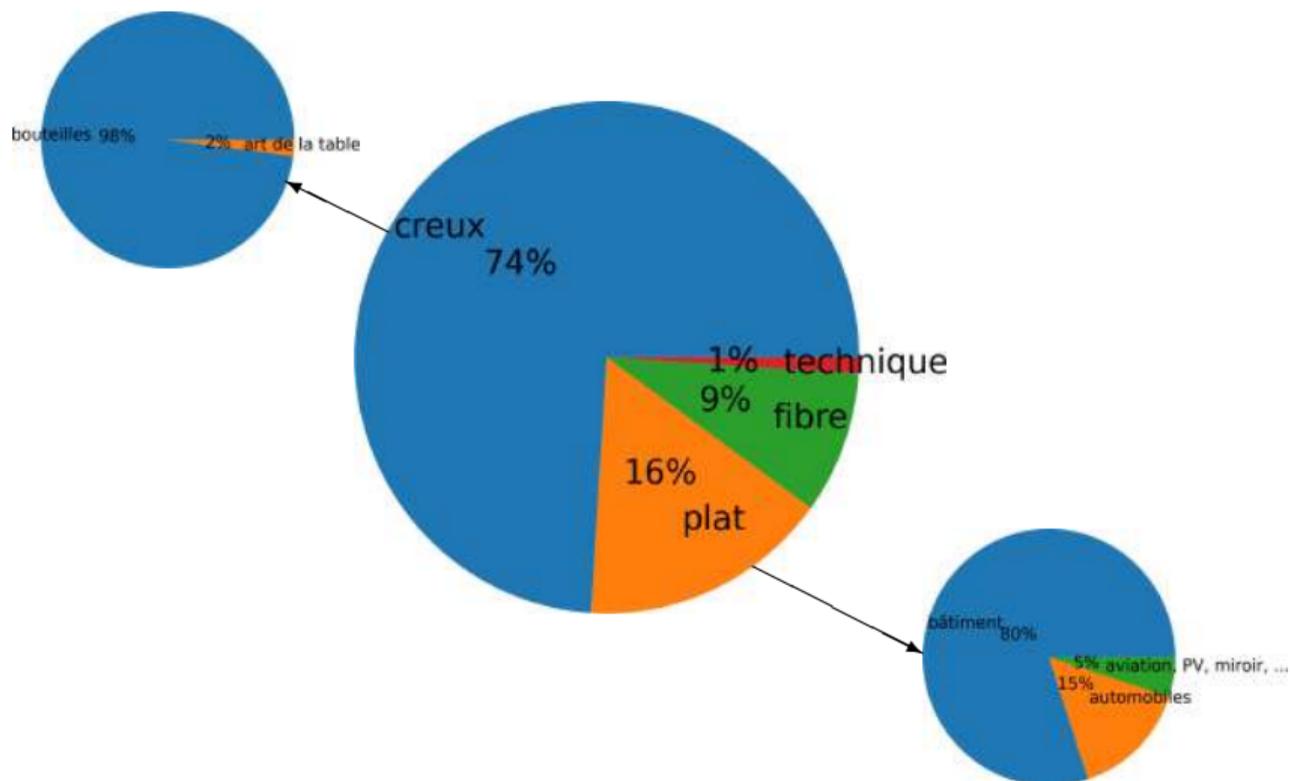
12

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



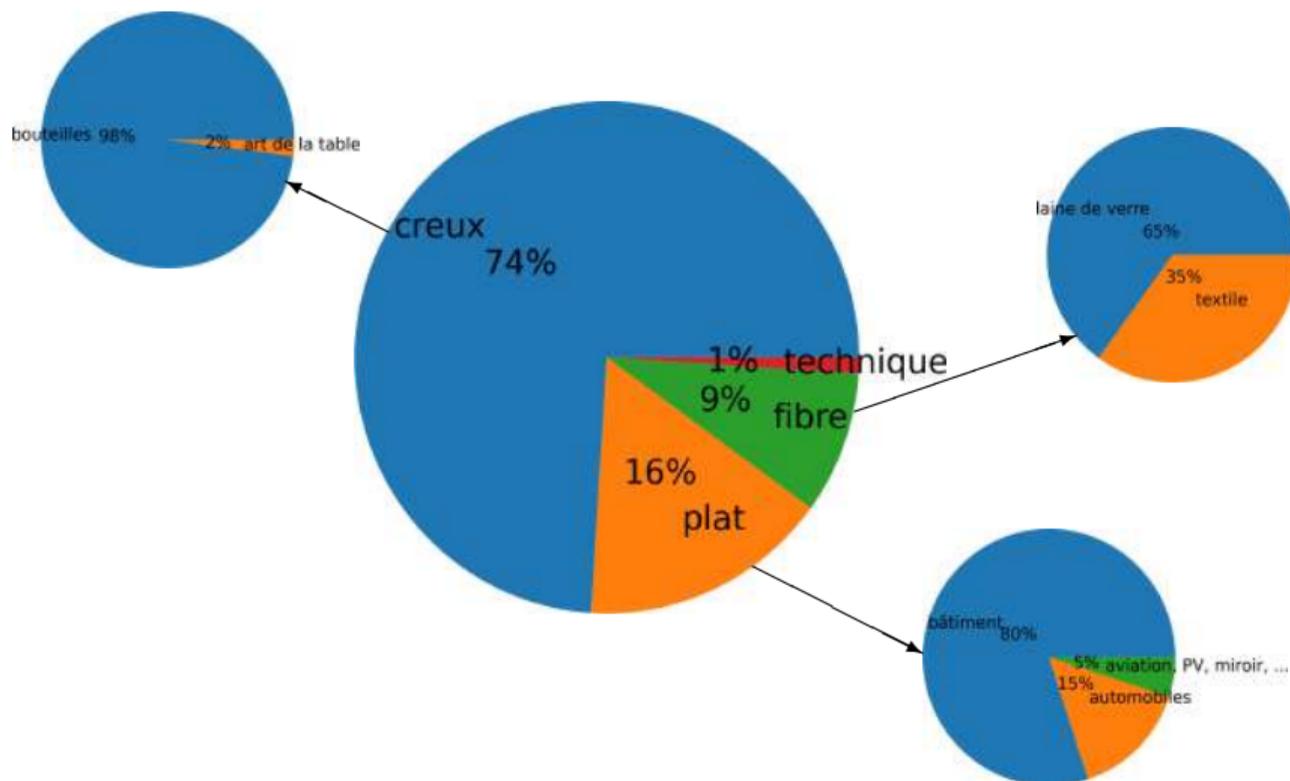
2. Production industriel du verre

- 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

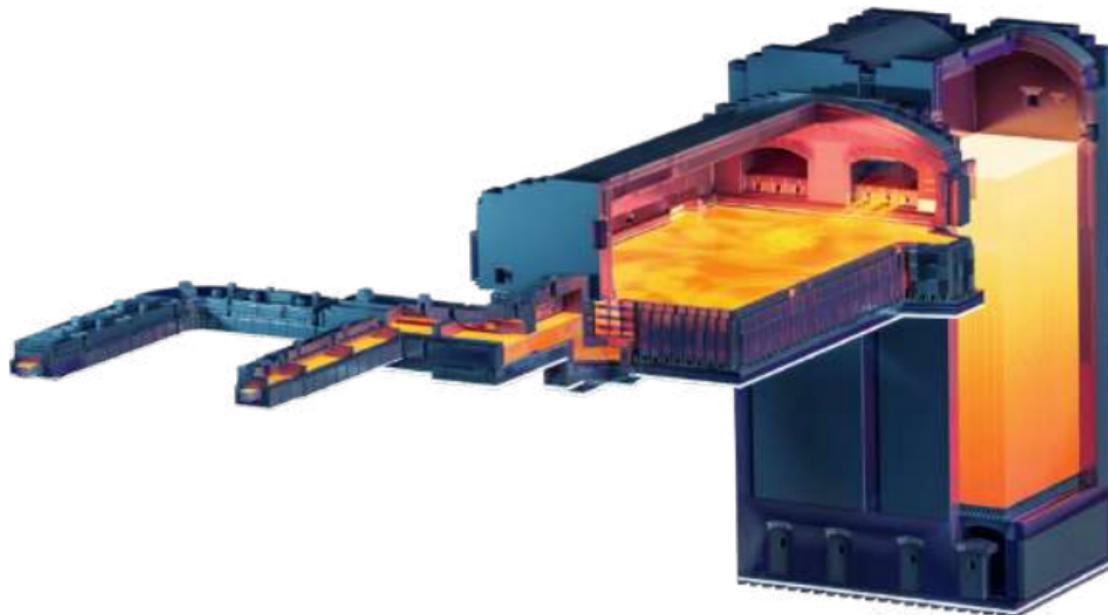
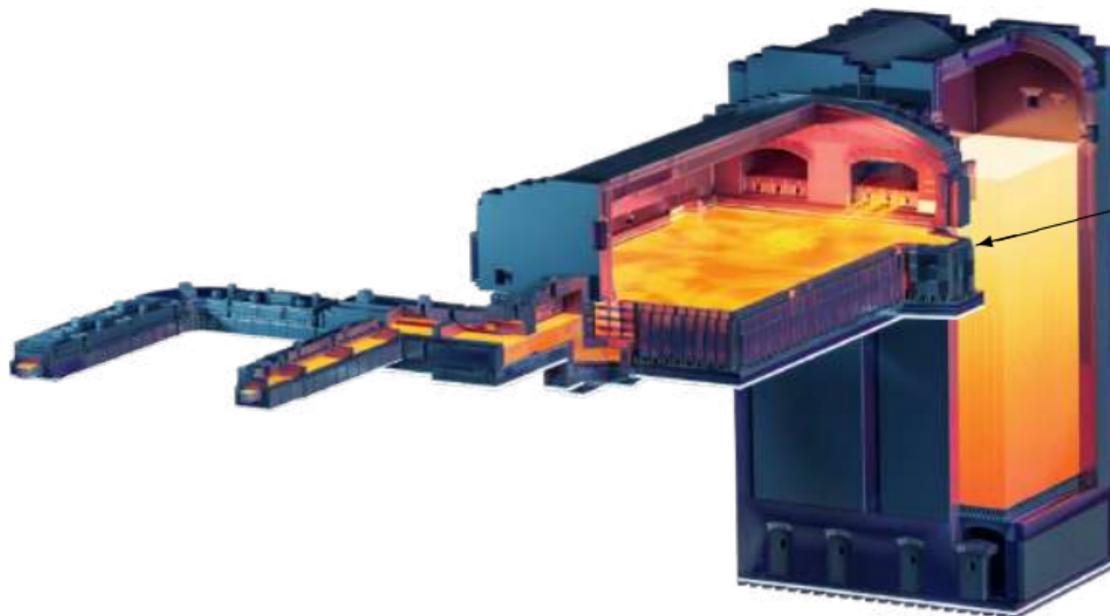


Image ForGlass®

2. Production industriel du verre



Matières premières

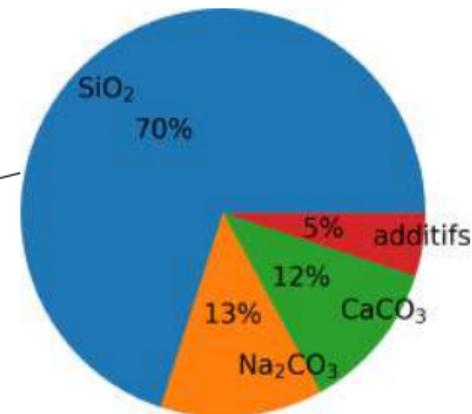
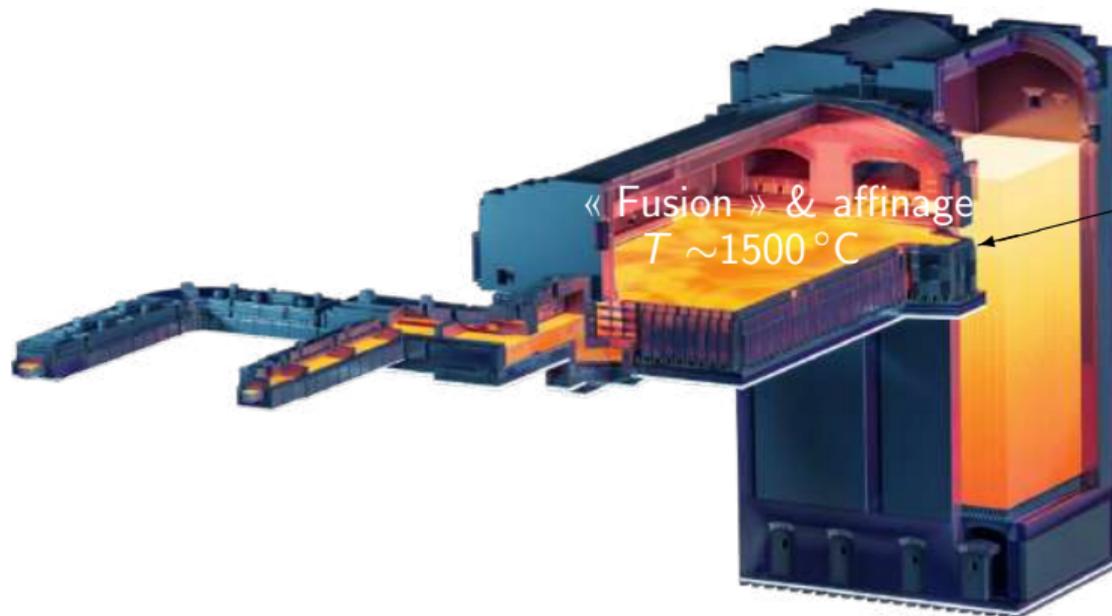


Image ForGlass[®]

2. Production industriel du verre



Matières premières

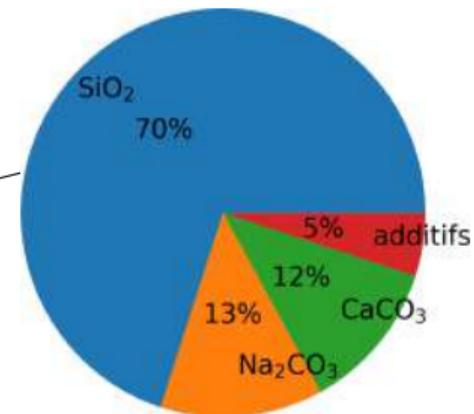
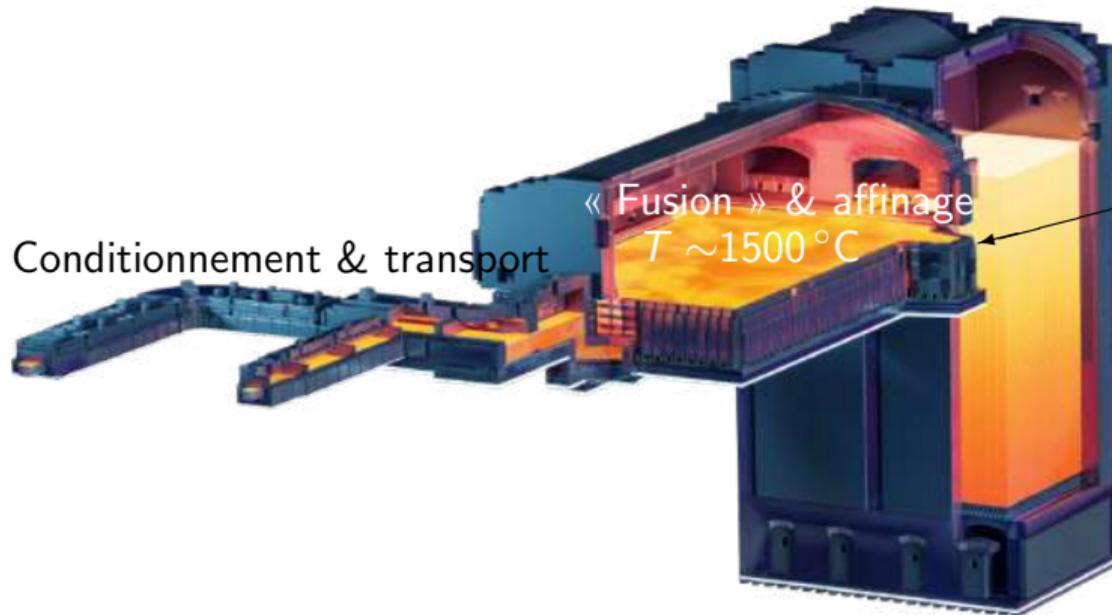


Image ForGlass®

2. Production industriel du verre

13



Matières premières

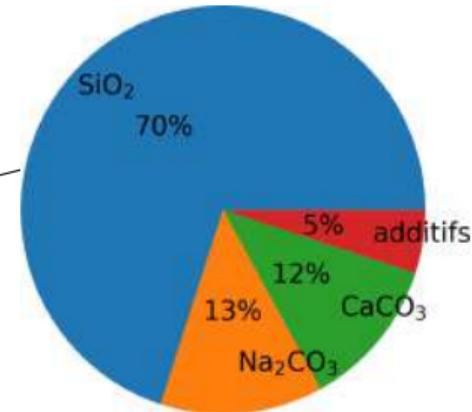
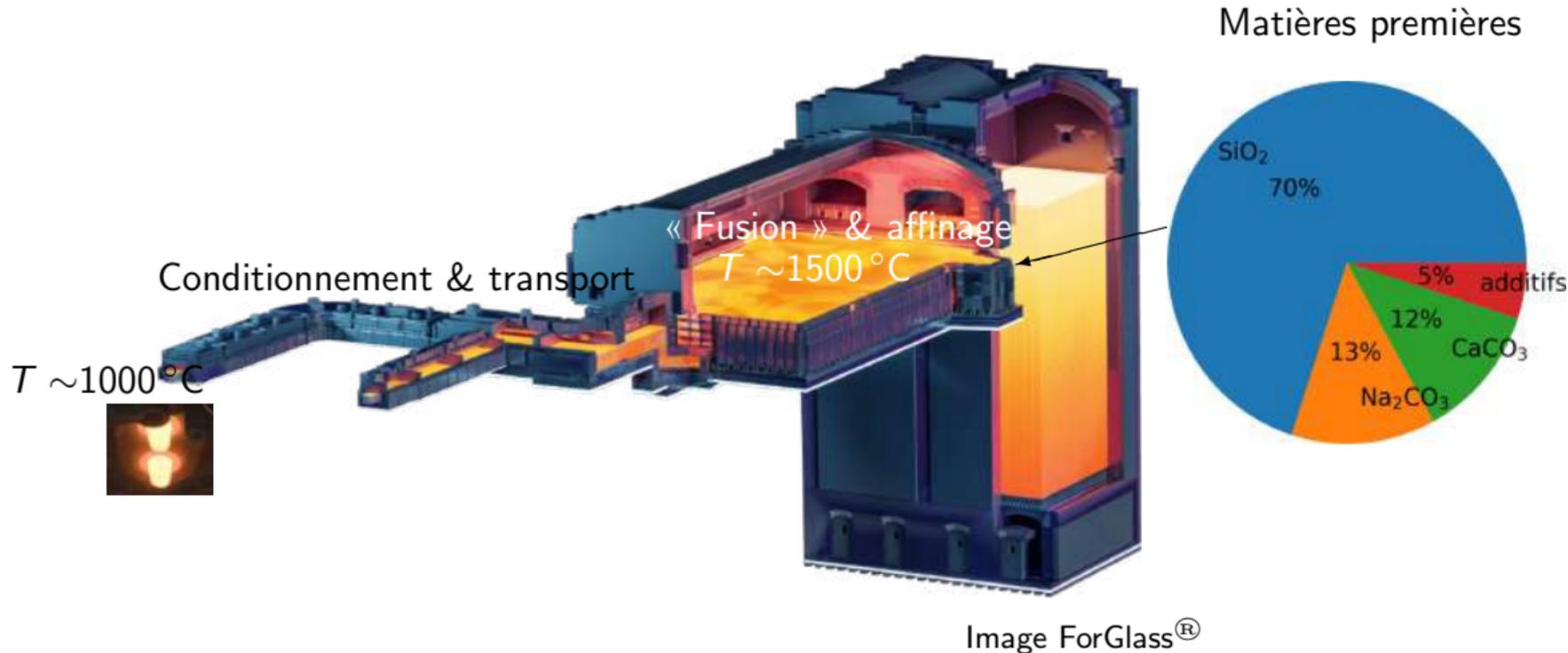


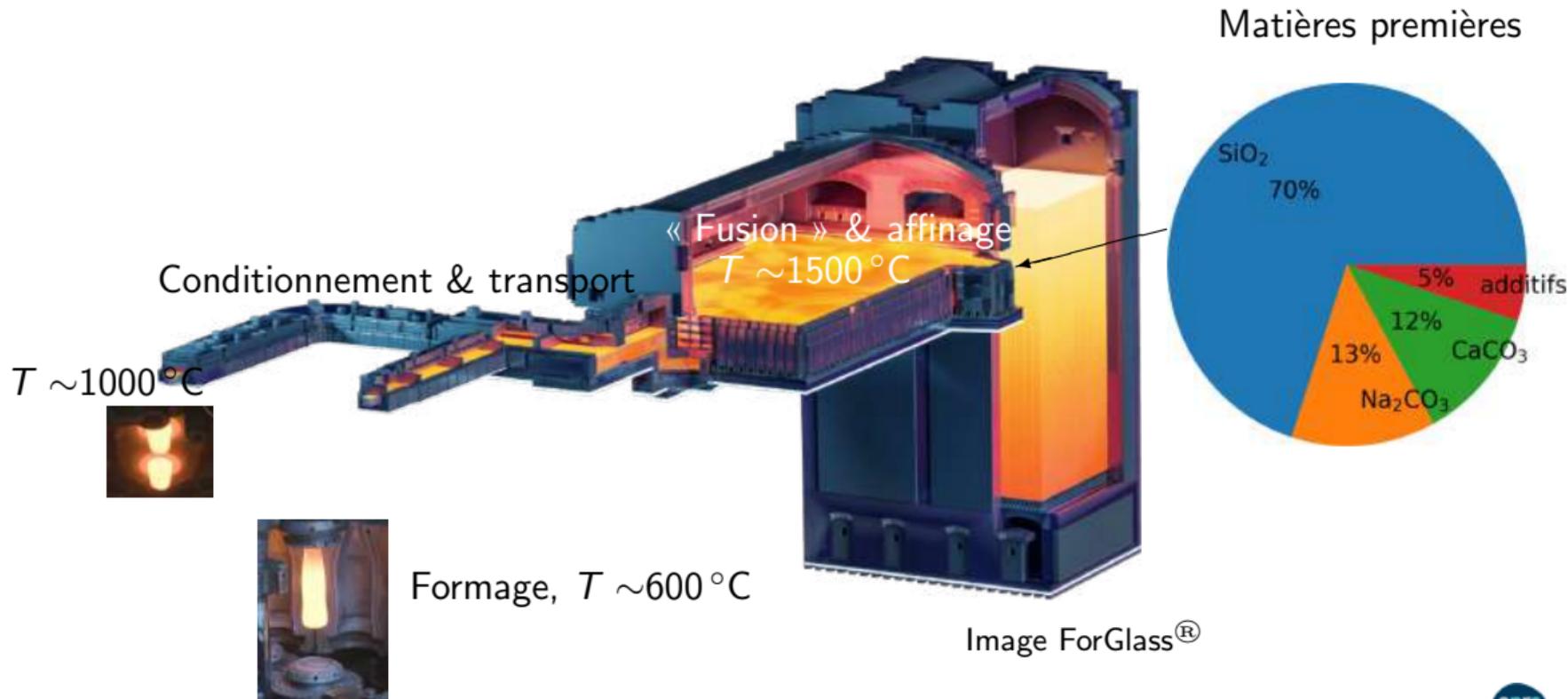
Image ForGlass[®]

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**.

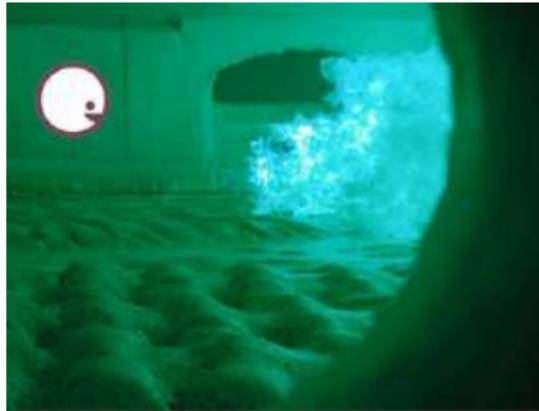


Figure 9 – Vue à l'intérieur d'un four « float » [images Saint-Gobain Recherche, Paris].

- ▶ L'énergie nécessaire ~ 1 à 2 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

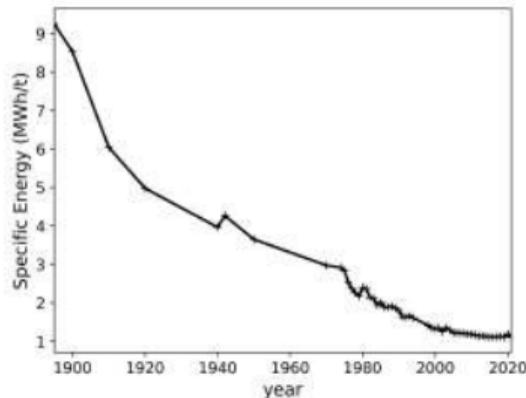


Figure 10 – Énergie spécifique vs. année.

	verre plat	verre creux	fibre de verre
Combustion	2,1 MW h t ⁻¹	1,7 MW h t ⁻¹	1,5 MW h t ⁻¹
électrique	0,5 MW h t ⁻¹	0,5 MW h t ⁻¹	1,7 MW h t ⁻¹

Table 1 – Consommation d'énergie spécifique par source et par type de verre⁴.

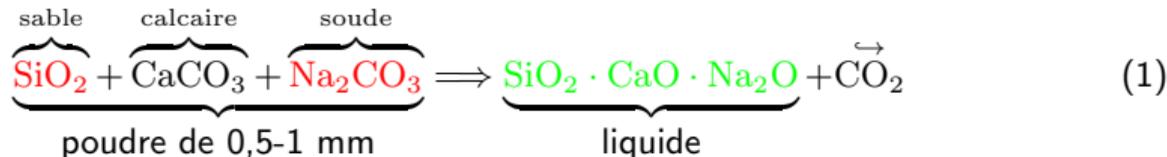
4. [Finance-ClimAct](#) : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière, 2021, [url](#) :

3. Enjeux écologiques

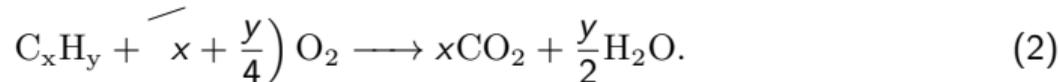
16

3.1 Émissions CO₂

- ▶ Selon le rapport Citepa⁵ :
 - ▶ Émissions nat. (2021) : 418 MtCO₂éq.
 - ▶ Émissions indus. : 77,8 MtCO₂éq.
 - ▶ Émissions indus. verrière : 2,7 MtCO₂éq. ➡ 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

3. Enjeux écologiques

3.1 Émissions CO₂

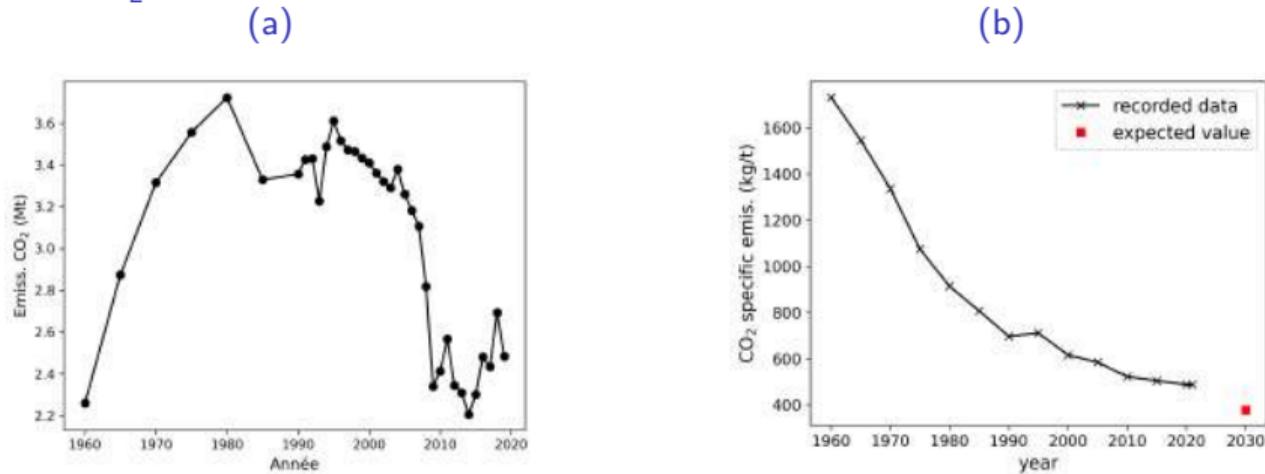


Figure 11 – Historique des émissions de CO₂ (indus. verre, Fr) : (a) totale et (b) spécifique.

verre plat	verre creux	fibre de verre
590 kg t ⁻¹	440 kg t ⁻¹	500 kg t ⁻¹

Table 2 – Émissions spécifiques de CO₂ par type de verre⁶.

6. 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

- ▶ 1 t de « calcin » dans un four :
 - ▶ 300 kg de CO₂ en moins ;
 - ▶ 200 kg de CO₂ en moins dans la synthèse du Na₂CO₃ 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	1 utilisation	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

Recyclage	Mature sur les verres d'emballage, en développement pour les autres verres
Efficacité énergétique	Optimisation des fours, préchauffage des matières premières ; récupération de la chaleur fatale, oxy-combustion
Électrification des procédés	A développer sur les fours de grande capacité ($>200 \text{ t d}^{-1}$)
Utilisation des bio-gaz	Simple à mettre en œuvre et ressource locale
Utilisation H₂	Conception des fours à revoir et accès à la ressource
Capture et stockage CO₂	Développement possible sur les technologies oxy-combustion

Table 4 – Leviers technologiques et tendances technico-économiques⁷.

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

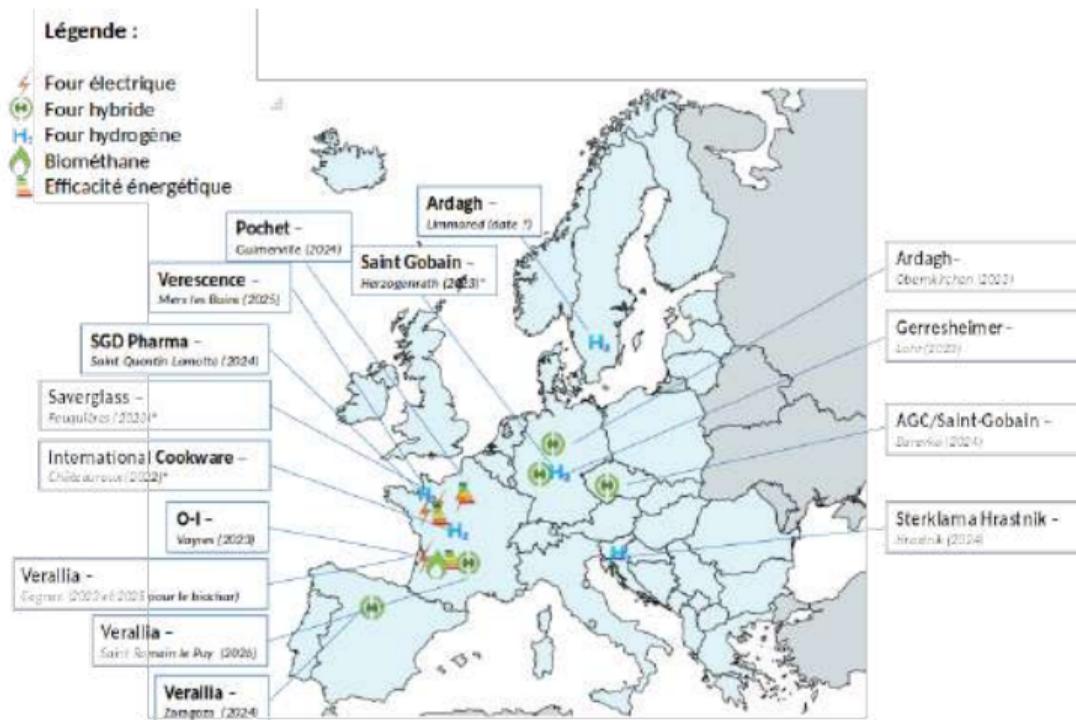


Figure 12 – Projets verre bas carbone recensés en oct. 2023 [X. Capilla, Institut du Verre].

4. Synthèse

21

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

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO₂éq.⁸.

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 ₂ éq.	0,2 MtCO ₂ éq.
Central	1,89 MtCO ₂ éq.	0,30 MtCO ₂ éq.
Tendancier	2,11 MtCO ₂ éq.	0,52 MtCO ₂ éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO₂éq.⁸.

► **Bonnes pratiques :**

- Transparence sur l’empreinte CO₂ 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 ₂ éq.	0,2 MtCO ₂ éq.
Central	1,89 MtCO ₂ éq.	0,30 MtCO ₂ éq.
Tendanciel	2,11 MtCO ₂ éq.	0,52 MtCO ₂ éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO₂éq.⁸.

▶ **Bonnes pratiques :**

- ▶ Transparence sur l’empreinte CO₂ 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 ₂ éq.	0,2 MtCO ₂ éq.
Central	1,89 MtCO ₂ éq.	0,30 MtCO ₂ éq.
Tendanciel	2,11 MtCO ₂ éq.	0,52 MtCO ₂ éq.

Table 5 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO₂éq.⁸.

- ▶ **Bonnes pratiques :**
 - ▶ Transparence sur l’empreinte CO₂ 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 (CO₂, H₂, 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) ;