



PSL

Cemef



ANR



TwinHeat

ANR INDUSTRIAL CHAIR



POCHET du COURVAL



Jumeaux Numériques pour le traitement thermique, l'optimisation et le contrôle des fours industriels

Les industries du verre se décarbonent, 19 mars 2025

1. Chaire industrielle ANR

- ▶ Constitution d'un partenariat industriel :



- ▶ Les partenaires apportent 50% du budget et l'ANR le reste avec 1 M€ minimum.
- ▶ Ecriture du projet à soumettre en mars.
- ▶ Audition des projets retenus en début juin.
- ▶ Résultats fin juin.
- ▶ Ecriture d'un accord de consortium dans les trois mois après acceptation.

2. Motivations de TwinHeat

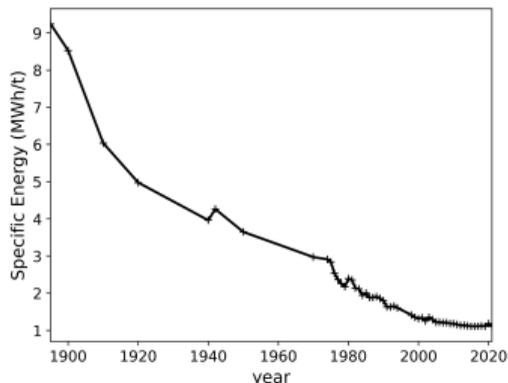


Figure 1 – Énergie spécifique vs. année.

Table 1 – Consommation d'énergie spécifique par source et par type de verre¹.

	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

1. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière, 2021, url :

<https://finance-climact.fr/wp-content/uploads/2021/06/memo-pts-verre-2021.pdf>.

2. Motivations de TwinHeat

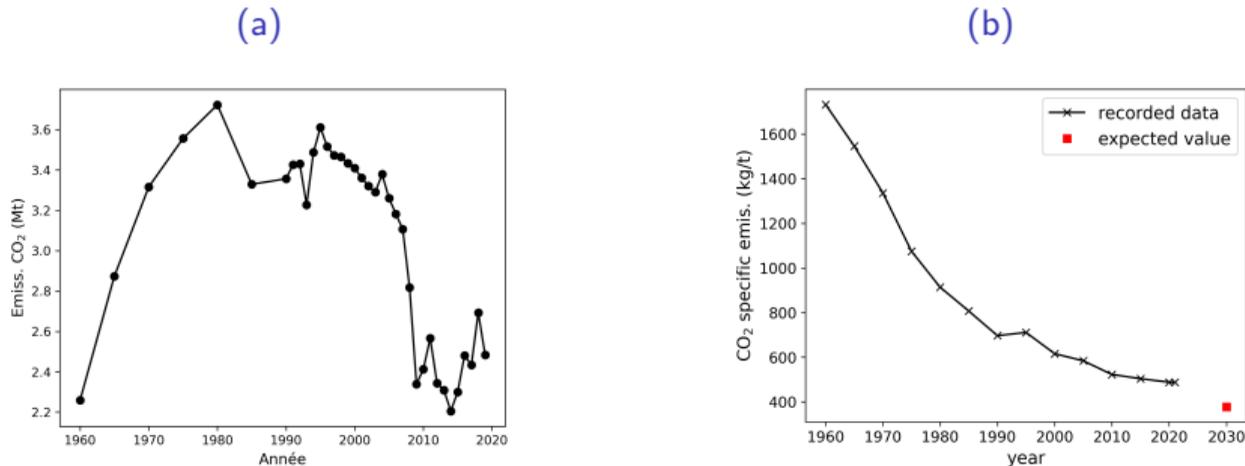


Figure 2 – Historique des émissions de CO₂ (indus. verre, Fr) : (a) totale et (b) spécifique.

Table 2 – Émissions spécifiques de CO₂ par type de verre².

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

2. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 1).

2. Motivations de TwinHeat

Table 3 – Leviers technologiques et tendances technico-économiques³.

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

3. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 1).

2. Motivations de TwinHeat

Table 3 – Leviers technologiques et tendances technico-économiques³.

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

3. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 1).

2. Motivations de TwinHeat

Table 4 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO₂éq.⁴.

	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.

- ▶ **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).

4. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 1).

2. Motivations de TwinHeat

Table 4 – Feuilles de route de la filière verre avec pour réf. émis. 2015 : 2,7 MtCO₂éq.⁴.

	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.

▶ 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).**

4. Finance-ClimAct : Plan de transition Sectoriel Verre : Mémo sur les enjeux de décarbonation de la filière (cf. note 1).

2. Motivations de TwinHeat

2030: -33% CO₂
Vs. 2017, scope 1 +2

Calcin & matières premières alternatifs

Combustion H₂

Four hybride

Optimisation & récupération chaleur fatale

Glass plant in India: Solar panels on roof producing ~4GWh for plant

2030: -46% CO₂
Vs. 2019, scope 1 +2

Four 100 % électrique

Cognac

Four hybride (80% elec./20% comb.)

St-Romain le Puy

Optimisation & récupération chaleur fatale

Lagnieu (ORC)

2033: -50% CO₂
Vs. 2014, scope 1 +2

Four 100 % électrique

Guimerville

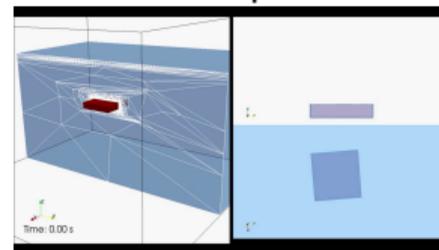
Verre recyclé SEVA et faible émission CO₂

2. Motivations de TwinHeat

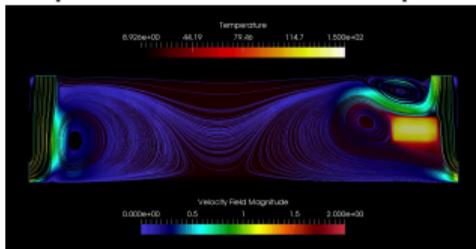
Four tournant



Trempe



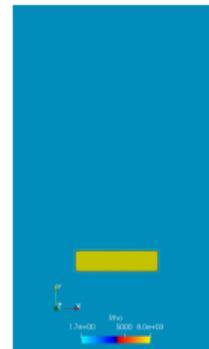
Optimisation thermique



$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

Optimisation de la trempe



3. Objectif de TwinHeat

Fournir un cadre numérique innovant couplé à l'Intelligence Artificielle

- ▶ améliorer les performances des fours (réduction de consommation et de l'empreinte CO2) ;
- ▶ accélérer la prise de décision pour fournir des produits de haute qualité ;
- ▶ soutenir des conceptions innovantes adaptées à la transition énergétique ;
- ▶ augmenter les rendements de production.

3. Objectif de TwinHeat

