



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

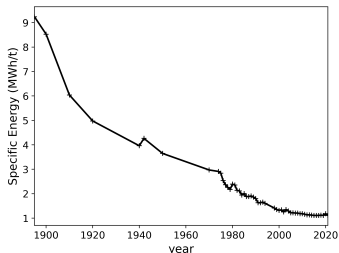


Figure 1 – Énergie spécifique vs. année.

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

|            | 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> |

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

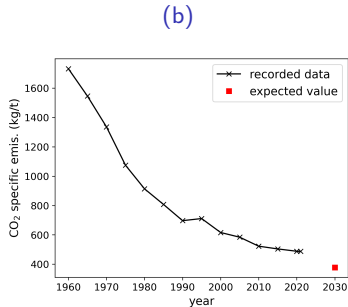
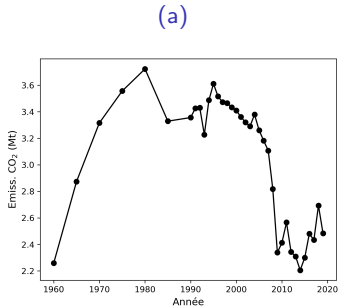


Figure 2 – Historique des émissions de CO<sub>2</sub> (indus. verre, Fr) : (a) totale et (b) spécifique.

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

| 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> |

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-économiques<sup>3</sup>.

|   |   |
|---|---|
| <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  |

---

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-économiques<sup>3</sup>.

|   |   |
|---|---|
| <b>Recyclage</b>                          | Mature sur les verres d'emballage, en développement pour les autres verres  |
| <b>Efficacité énergétique</b>             | <b>Optimisation des fours</b> , 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>          | <b>Conception des fours à revoir et accès à la ressource</b>  |
| <b>Capture et stockage CO<sub>2</sub></b> | 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 MtCO<sub>2</sub>éq.<sup>4</sup>.

|            | 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. |

- ▶ **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).

---

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 MtCO<sub>2</sub>éq.<sup>4</sup>.

|            | 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. |

### ▶ 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).**

---

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% CO<sub>2</sub>**  
Vs. 2017, scope 1 +2

Calcin & matières premières alternatifs

Combustion H<sub>2</sub>

Four hybride

Optimisation & récupération chaleur fatale

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

**2030: -46% CO<sub>2</sub>**  
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% CO<sub>2</sub>**  
Vs. 2014, scope 1 +2

Four 100 % électrique

Guimerville

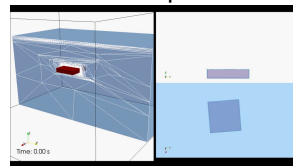
Verre recyclé SEVA et faible émission CO<sub>2</sub>

## 2. Motivations de TwinHeat

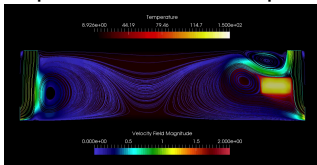
Four tournant



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

