

# HYBRIDATION ÉNERGÉTIQUE DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS - #27

28 mai 2024



# Sommaire

- Restitution de l'étude ALLICE #27
- Présentations :
  - Contexte, périmètre et objectifs de l'étude - CETIAT
  - Phase 1 : État des lieux des solutions d'hybridation - CETIAT
  - Hybridation H2, transformation de l'électricité en combustible – Bulane
  - Hybridation H2, focus sur les brûleurs – Fives Stein
  - Phase 2 : Présentation de la méthodologie générale et des cas d'études - CETIAT
  - Témoignage secteur verrier – Owens Corning
  - Hybridation et réduction des coûts énergétiques – Energy Pool
  - Phase 3 : conclusion de l'étude - CETIAT



François Vial



Lauriane Giroud



Nicolas Jerez,  
Bulane



Sébastien Caillat,  
Fives Stein



Emmanuel Vaquant,  
Owens Corning



Etienne Roux,  
Owens Corning



Bertrand Munier,  
Energy Pool

# Contexte, périmètre et objectifs de l'étude

# CONTEXTE

Secteur industriel

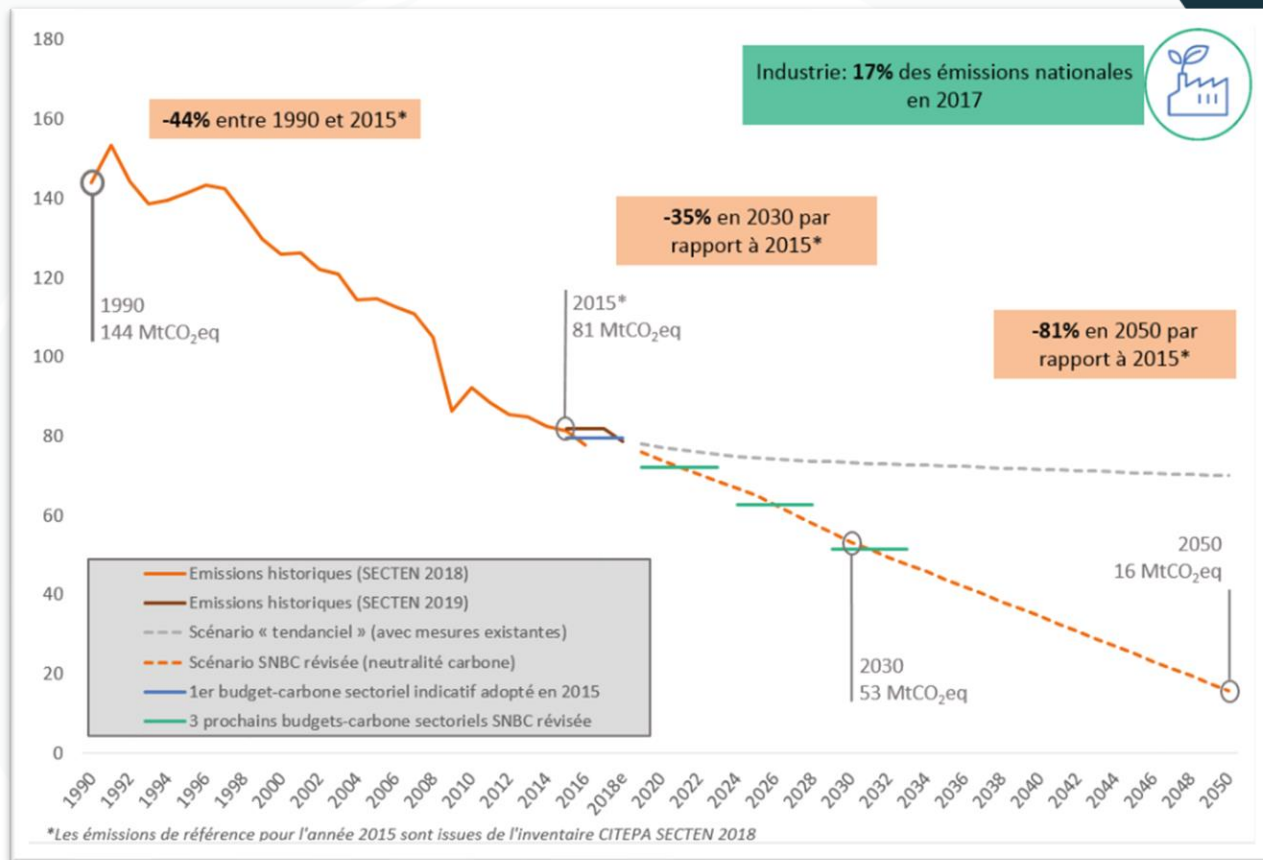
→ 1/5 des émissions national

## Objectifs de la SNBC

→ Neutralité carbone d'ici 2050

→ -81% des émissions du secteur industriel d'ici à 2050 par rapport à l'année 2015

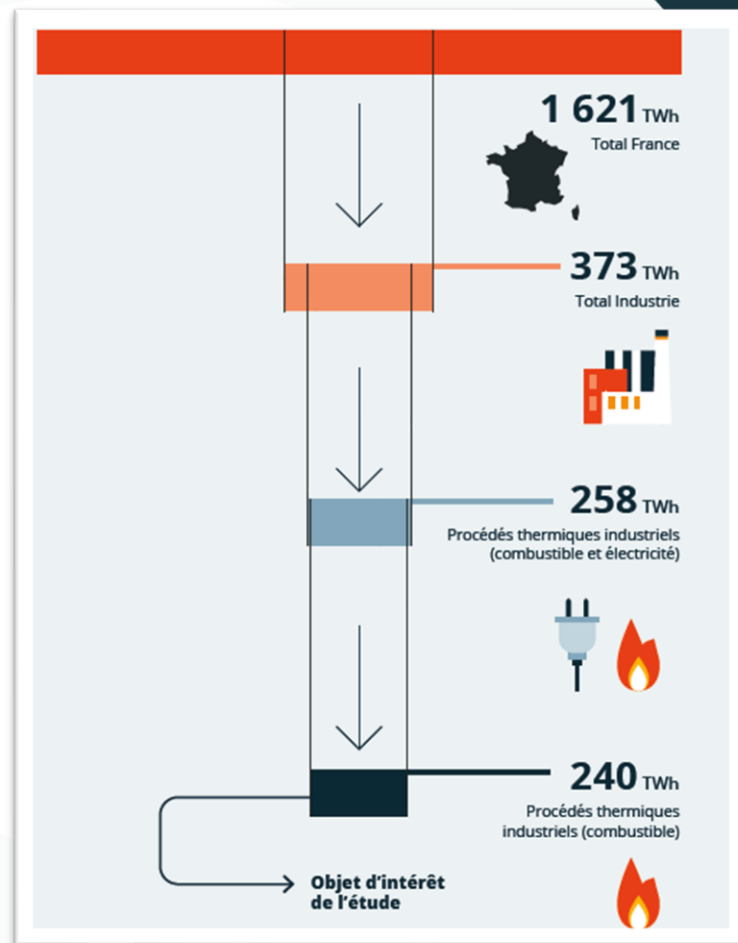
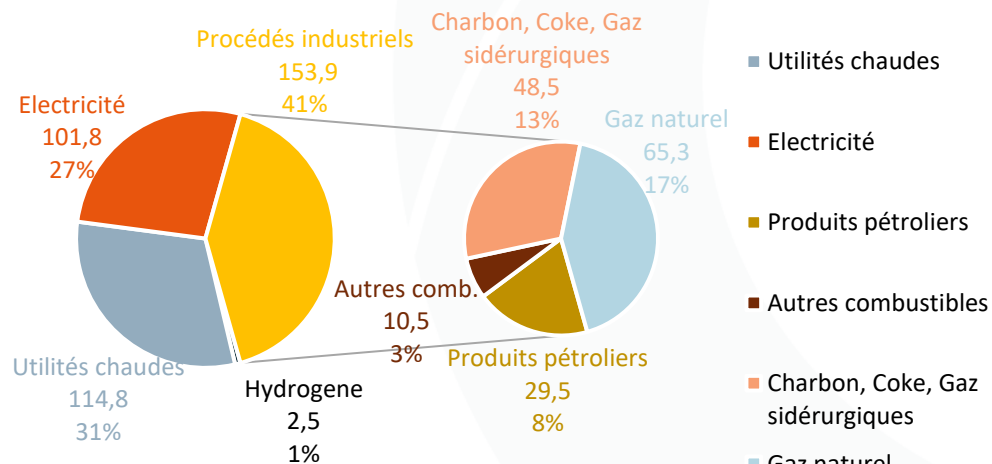
Continuité de l'étude ALLICE réalisées en 2021 sur les potentiels d'électrification des procédés thermiques industriels (analyse technico-économique et enjeux marchés et réseaux)



# CONTEXTE

Consommation brute d'énergie y compris comme  
matière première

372 TWh - donnée INSEE pour l'année 2020



# OBJECTIFS

Identifier les **opportunités**  
à court terme de projets  
de **décarbonation** via  
l'hybridation énergétique

Comprendre et mieux  
appréhender les  
**couplages** possibles de  
technologies et les  
besoins technologiques

Informar sur les **obstacles**  
**technologiques et**  
**économiques** des  
techniques d'hybridation

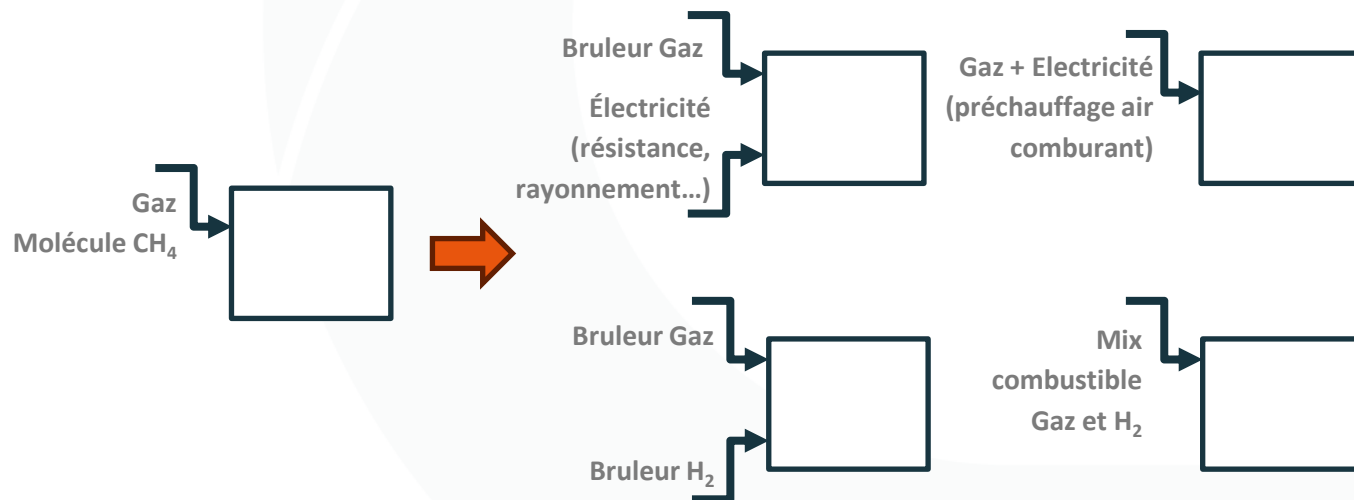
# PERIMETRE

Les solutions d'hybridation directe (sont exclu le stockage, les réseaux d'utilités ...)

Hybridation entre le GN et l'électricité ou le GN et l'hydrogène

Les procédés difficilement décarbonables (haute température...)

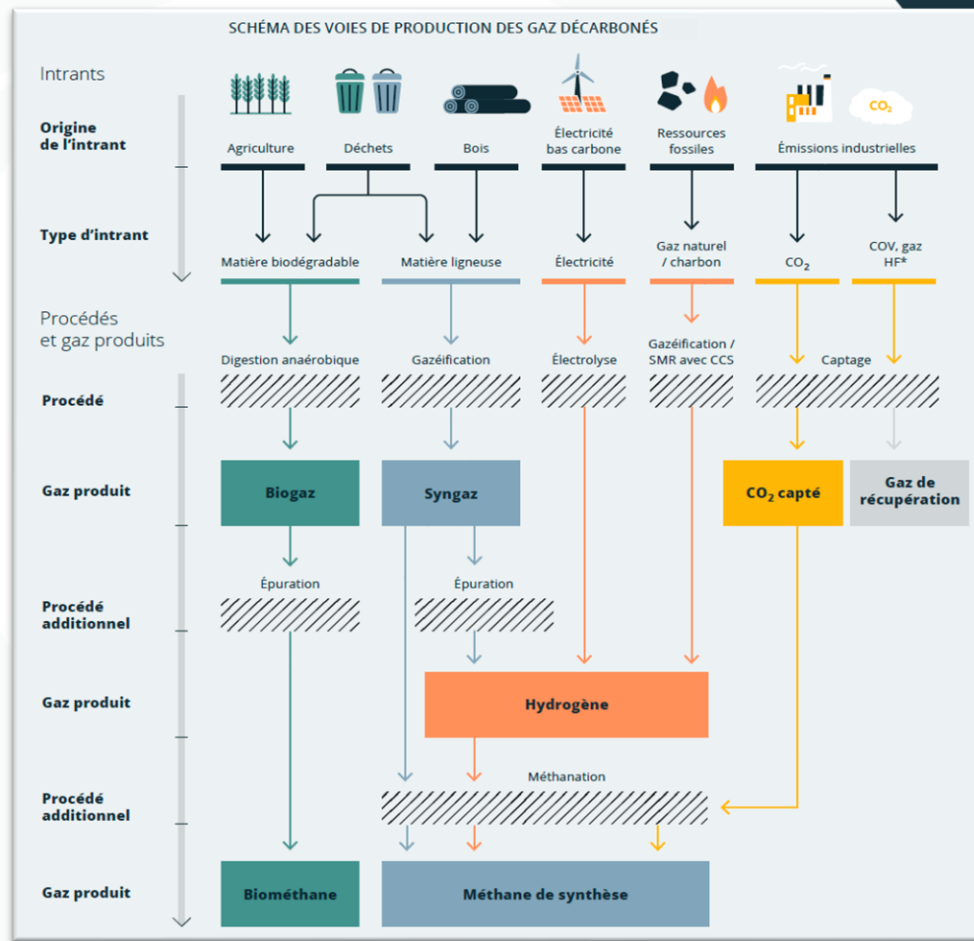
On suppose une offre en électricité et Hydrogène décarboné



# PERIMETRE

Etude ALLICE → Potentiel d'intégration des gaz décarbonés en industrie

|                              | COMPOSITION                                                   | PCI<br>kWh/Nm <sup>3</sup> |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Biogaz</b>                | CH <sub>4</sub> : 50 % - 60 %                                 | 5 - 7                      |
|                              | CO <sub>2</sub> : 40 % - 45 %                                 |                            |
| <b>Biométhane</b>            | CH <sub>4</sub> : >97 %                                       | 10<br>13 kWh/kg            |
| <b>Syngaz</b>                | CH <sub>4</sub> : 3 - 12 %                                    | 1 - 5                      |
|                              | CO : 5 - 50 %                                                 |                            |
|                              | H <sub>2</sub> : 10 - 40 %                                    |                            |
|                              | CO <sub>2</sub> : 10 - 30 %                                   |                            |
| <b>Méthane de synthèse</b>   | CH <sub>4</sub> : >97 %                                       | 10                         |
| <b>Hydrogène</b>             | H <sub>2</sub> : 99,5 - 99,99 %                               | 3<br>33 kWh/kg             |
| <b>Gaz de haut fourneau</b>  | CO <sub>2</sub> : 22 %                                        | 1                          |
|                              | CO : 22 %                                                     |                            |
|                              | H <sub>2</sub> : 5 %                                          |                            |
|                              | N <sub>2</sub> : 51 %                                         |                            |
| <b>Gaz contenant des COV</b> | Concentration en COV des fumées**<br>< 110 mg/Nm <sup>3</sup> | < 8.10 <sup>-4</sup>       |
| <b>Gaz naturel</b>           | CH <sub>4</sub> : 81 - 97 %                                   | 10 - 11                    |
| <b>Hydrogène fossile</b>     | H <sub>2</sub> : 95 - 99,9 %                                  | 3                          |



# CONTENU DE L'ETUDE

## PHASE 1

Réalisation de l'état des lieux des solutions, les offres existantes et les enjeux technologiques

## PHASE 2

Cette phase est consacrée à la réalisation de 3 études de cas.

## PHASE 3

Analyse et conclusions de l'étude

# PHASE 1 – ETAT DES LIEUX

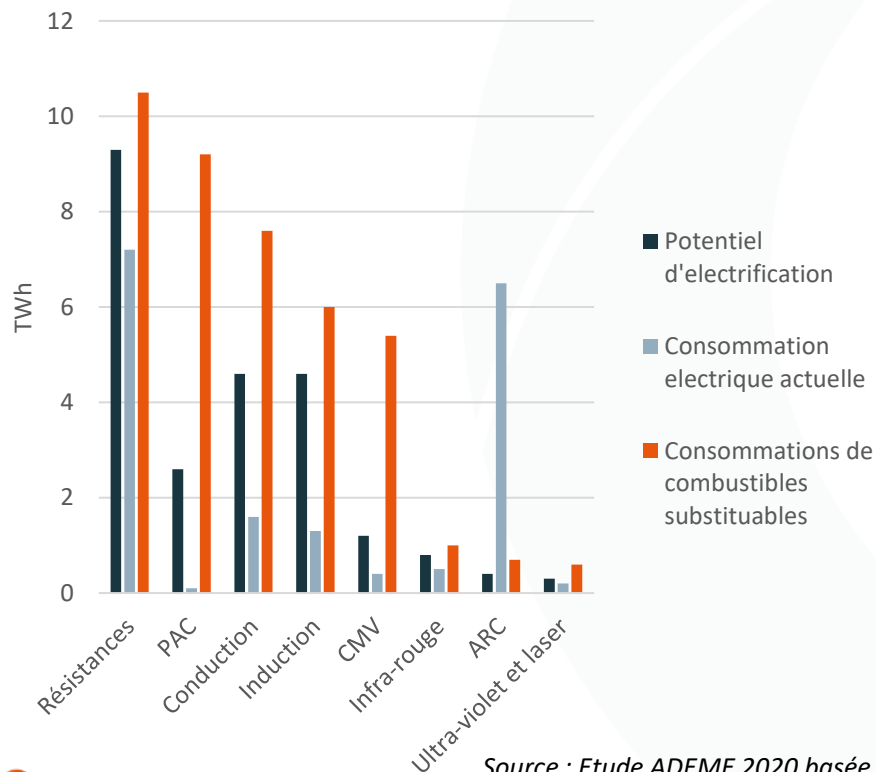
**La décarbonation par électrification**

**La décarbonation par l'hydrogène**

**Les procédés industriels difficilement décarbonables**

# La décarbonation par électrification

## Les technologies d'électrification



Source : Etude ADEME 2020 basée sur les données CEREN de 2014

### Résistances

- Technologie mature
- Large plage de température

### Pompe à Chaleur (PAC)

- Technologie mature et en devenir à HT
- Basse température (<200°C)
- Rendement élevé (≈300%)

### Conduction

- Contact direct (électrodes)
- Dépend des propriétés physiques du matériau

### Induction

- Contact indirect (champ magnétique variable)
- Dépend des propriétés physiques du matériau

### Compression Mécanique de Vapeur (CMV)

- Technologie mature
- Basse température → usages vapeur
- Rendement très élevé

# La décarbonation par électrification

## *Les freins et les leviers de l'électrification*

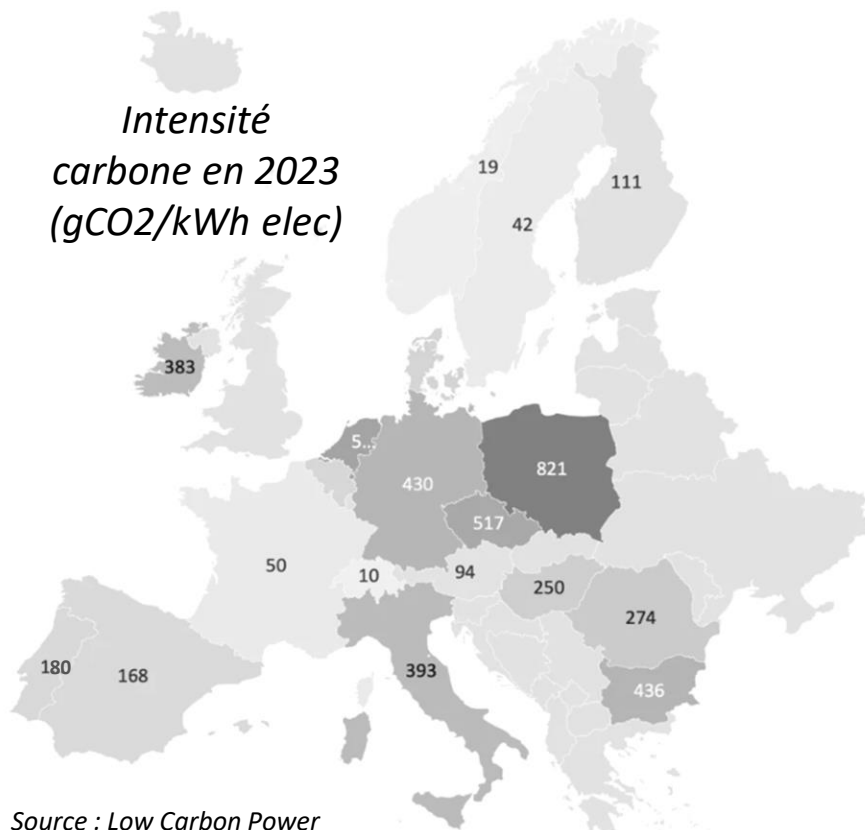
### - FREINS

- Fours : électrification moins adaptée aux grandes capacités de production
- Chauffage par convection (montée rapide et homogénéité en température) : limite de fonctionnement des ventilateurs à 500°C
- OPEX élevé → variable suivant le prix des énergies par pays
- Poids carbone de l'électricité

### + LEVIERS

- Offre une flexibilité et une adaptabilité aux marchés de l'énergie
- Décarbonation si mix électricité bas carbone
- Offre d'électricité bas carbone disponible

*Intensité  
carbone en 2023  
(gCO<sub>2</sub>/kWh elec)*



Source : Low Carbon Power

# La décarbonation par l'hydrogène

## Les modes de production

| Couleur   | Vecteur               | Procédé       | Dénomination       |
|-----------|-----------------------|---------------|--------------------|
| Noir      | Charbon ou pétrole    | Gazéification | Carboné ou fossile |
| Gris      | Gaz naturel           | SMR*          | Carboné ou fossile |
| Bleu      | Gaz naturel           | SMR* avec CSC | Bas carbone        |
| Turquoise | Gaz naturel           | Pyrolyse      | Bas carbone        |
| Rose      | Electricité nucléaire | Electrolyse   | Bas carbone        |
| Jaune     | Mix électrique FR     | Electrolyse   | Bas carbone        |
| Vert      | Electricité ENR       | Electrolyse   | Renouvelable       |
| Blanc     | H2 à l'état naturel   | NA            | NA                 |

\* SMR Steam Methane Reforming ou Vaporeformage du méthane

### SMR ou Vaporeformage

- Procédé le plus utilisé → meilleur rapport prix / impact carbone
- Réaction du méthane avec de la vapeur à très haute température
- $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$
- 11 kg de  $\text{CO}_2$  eq par kg de  $\text{H}_2$  produit (**330 kg/MWh**)

### Gazéification

- Réaction de gazéification à la vapeur à haute température
- $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$

### Electrolyse de l'eau

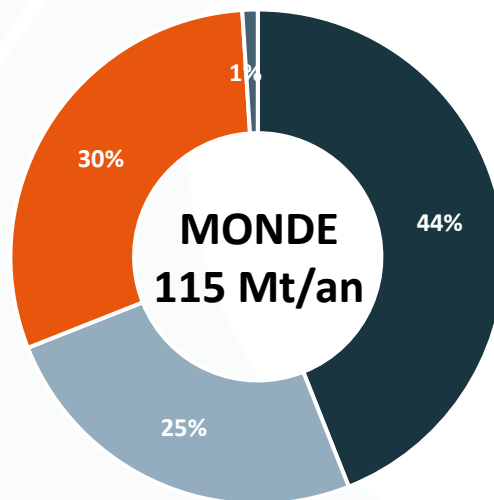
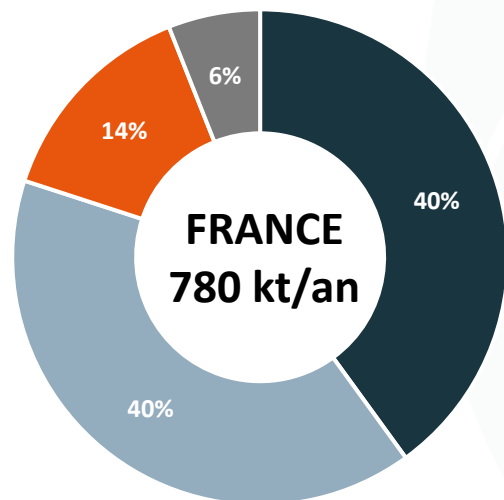
- Conversion de l'eau en hydrogène par un courant électrique
- $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
- Entre 1,5 et 3 kg de  $\text{CO}_2$  eq par kg de  $\text{H}_2$  produit (**entre 50 et 100 kg/MWh**)

### Pyrolyse du méthane

- Méthode en devenir
- Décomposition du méthane à très haute température et en absence d'oxygène
- $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$

# La décarbonation par l'hydrogène

## *Les modes de production*



■ Gaz Naturel ■ Co-produit de la pétrochimie ■ Charbon ■ Electrolyse

Co production

- > Raffinerie
- > Cokerie

Objectifs de capacité de production électrolytique (Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène)

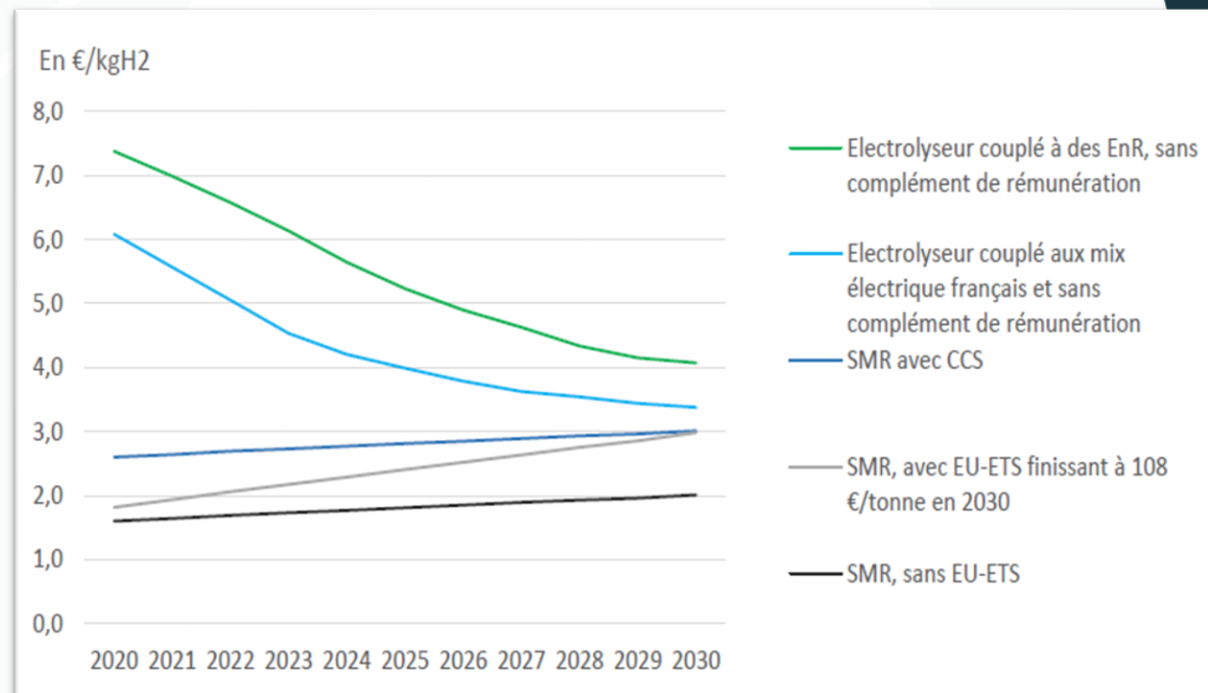
- > 6,5 GW en 2030
- > 10 GW en 2035
- > 0,3 GW sécurisée en 2023

Source : SIA Partners

# La décarbonation par l'hydrogène

## *Les enjeux économiques du marché*

- Production **d'hydrogène bas carbone** → prix pas encore compétitif
- Décroissance des coûts CAPEX attendu
- Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène → **7 Milliards d'euros** pour aider à construire la filière



Source : AFHYPAC – étude du potentiel de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone en France à horizon 2030

# La décarbonation par l'hydrogène

## *Les défis techniques*

### La production

- Basculer vers les procédés décarboné
- Procédés de production plus efficaces

### Le stockage et la distribution

- Faible densité de l'hydrogène
  - > Volumes de stockages importants
  - > Point de liquéfaction à  $-253^{\circ}\text{C}$
- L'hydrogène présente une diffusivité et une explosivité élevée
  - > Risque de fuite plus élevé
  - > Contraintes de sécurité accrue
  - > Matériaux adaptés

### L'hydrogène comme combustible

- Brûleurs 100%  $\text{H}_2$  existant - technologie mature
- Brûleurs industriels adaptés pour des mélanges avec 15% à 25% de  $\text{H}_2$
- Combustion du  $\text{H}_2$  proche du GN
  - > Baisse du débit des fumées de 3 à 4%
  - > Stress thermique plus élevé
  - > Risque de retour de flamme plus élevé
  - > Plus propice à la formation de  $\text{NO}_x$
- Combustion directe → étude d'impact sur les produits à valider

# Les procédés difficilement décarbonables

Très haute  
température

Puissance  
élevée

Contraintes  
opérationnelles

Coût de  
remplacement  
important

- Chimie minérale (engrais, gaz industriels...)
- Chimie organique (Pétrochimie, plastique, caoutchouc...)
- Chimie autre (Pharmaceutique, cosmétique, entretien...)
- Procédés du secteur
  - > Fours hautes températures
  - > Sécheurs
  - > Process distillation, réacteurs...
  - > Usage vapeur important

Chimie



- Four de calcination : Transformation de la matière première
- Fours de fusion : Mise en forme de la matière
- Fours de cuisson : Transmettre les propriétés physiques attendu au produit
- Four de séchage : Extraction de l'humidité du produit

Matériaux

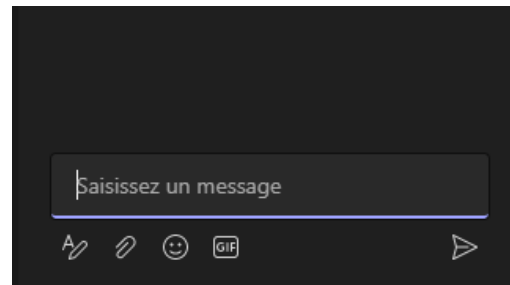
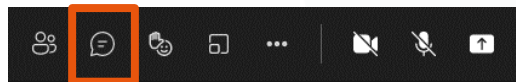


- Transformation de la matière première : Haut fourneau → réduction de l'oxyde de Fer
- Mise en forme du produit
  - > Forge
  - > Fonderie
- Traitement thermique
- Traitement de surface

Métallurgie



# Posez vos questions !



# Bulane - Hybridation H<sub>2</sub>, transformation de l'électricité en combustible

## Décarboner les flammes industrielles, l'enjeu de plusieurs secteurs d'activité



« **70%** des Procédés Thermiques Industriels  
qui utilisent des flammes/combustions  
**ne sont pas directement électrifiables.** »

*Étude Alliance ALLICE  
Potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels*

**Comment allier la flexibilité du gaz  
à la vertu de l'électricité ?**

Une flamme/combustion hydrogène, **partielle**  
(hybridation) ou **totale** (100% H<sub>2</sub>), produite localement  
grâce à des électrolyseurs spécifiques, permettrait  
d'engager immédiatement une **décarbonation** et une  
**pérennisation** de vos activités.

### Marchés Cibles



Spiritueux



Finition métaux



Industrie du verre



Micro-électronique



Alimentaire



LED

Convertir rapidement les brûleurs industriels à la combustion hydrogène = électrification indirecte



2 | Chauffage industrielle



Brûleur industriel  
Flamme 100 kW

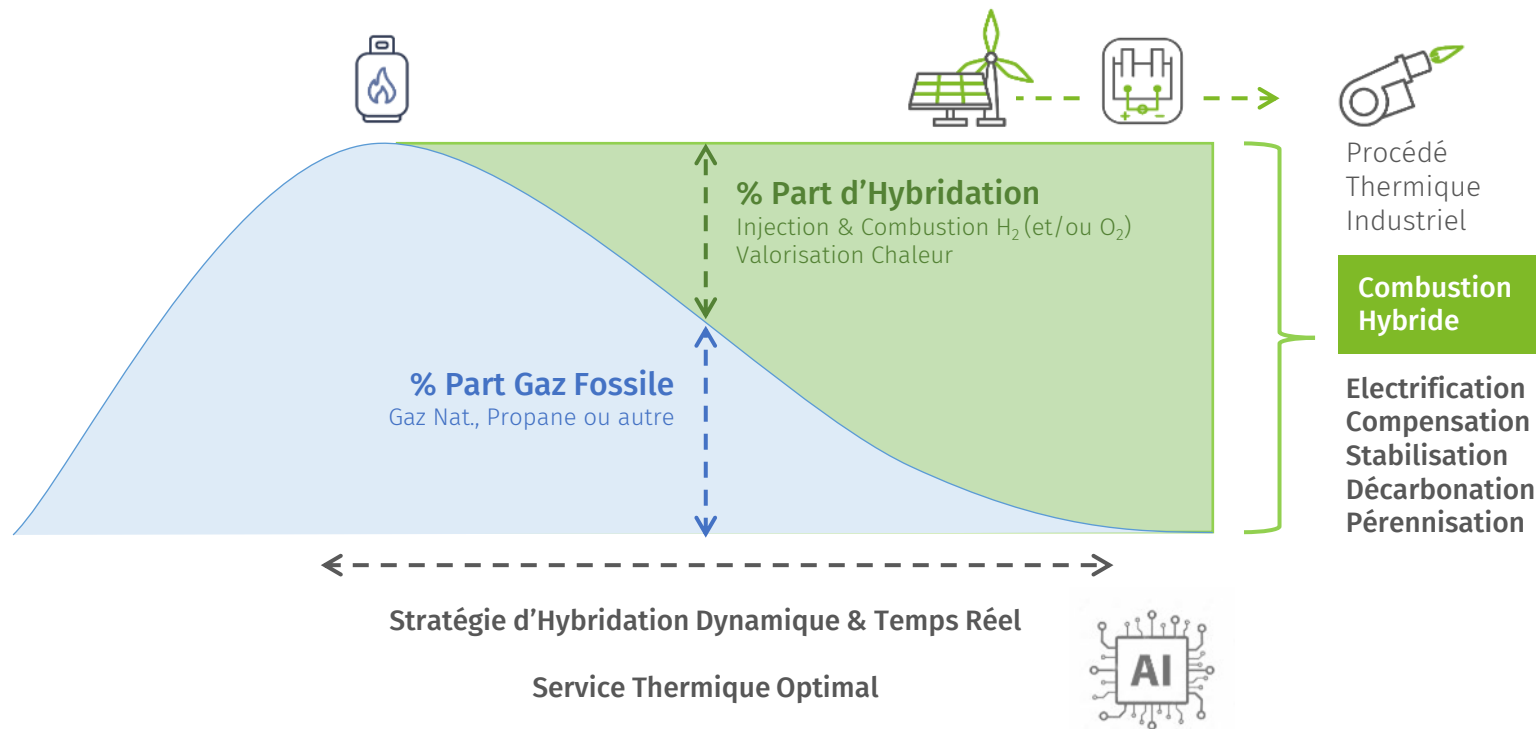




# Plug'In Hydrogène | Hybridation des appareils à gaz fossile



Build'Up d'une Combustion Hybride Optimisée, basée sur le gaz ET l'électricité !

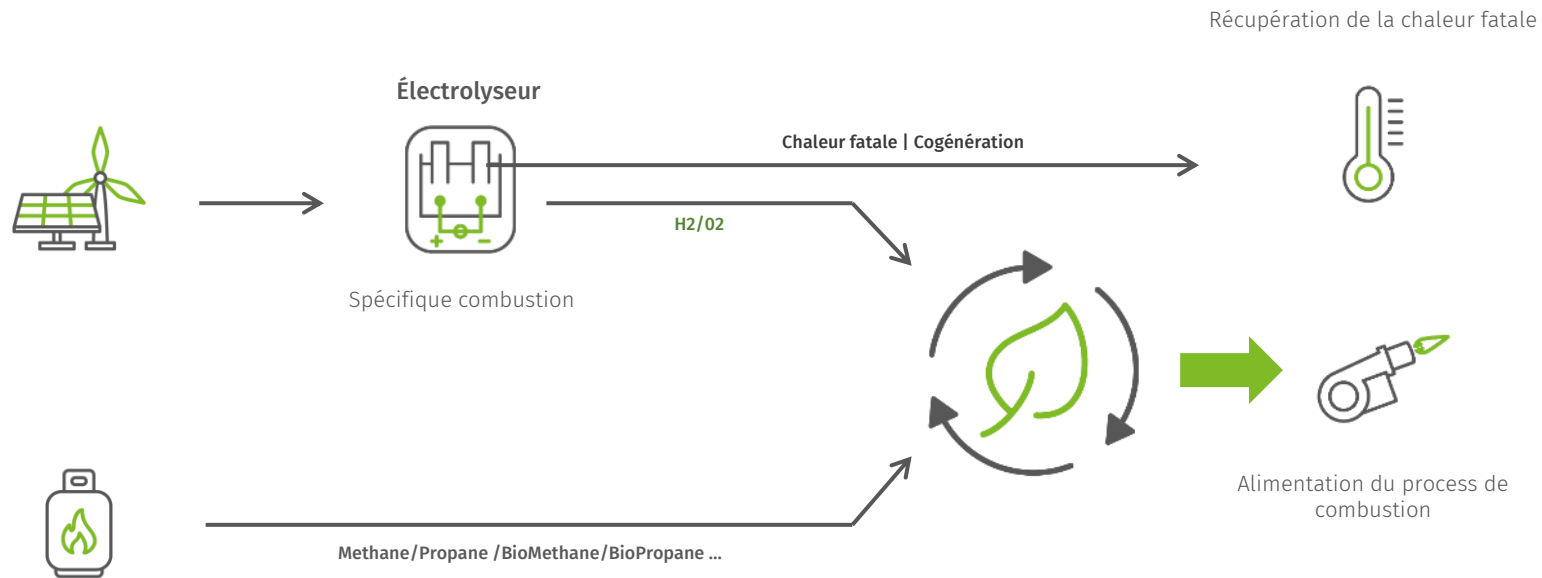




# L'hybridation Énergétique | Principe



## Principe de l'hybridation Énergétique





# L'hybridation énergétique | Pilotage flexible et autonome à l'instant T



## Stratégie d'hybridation dynamique & en temps réel

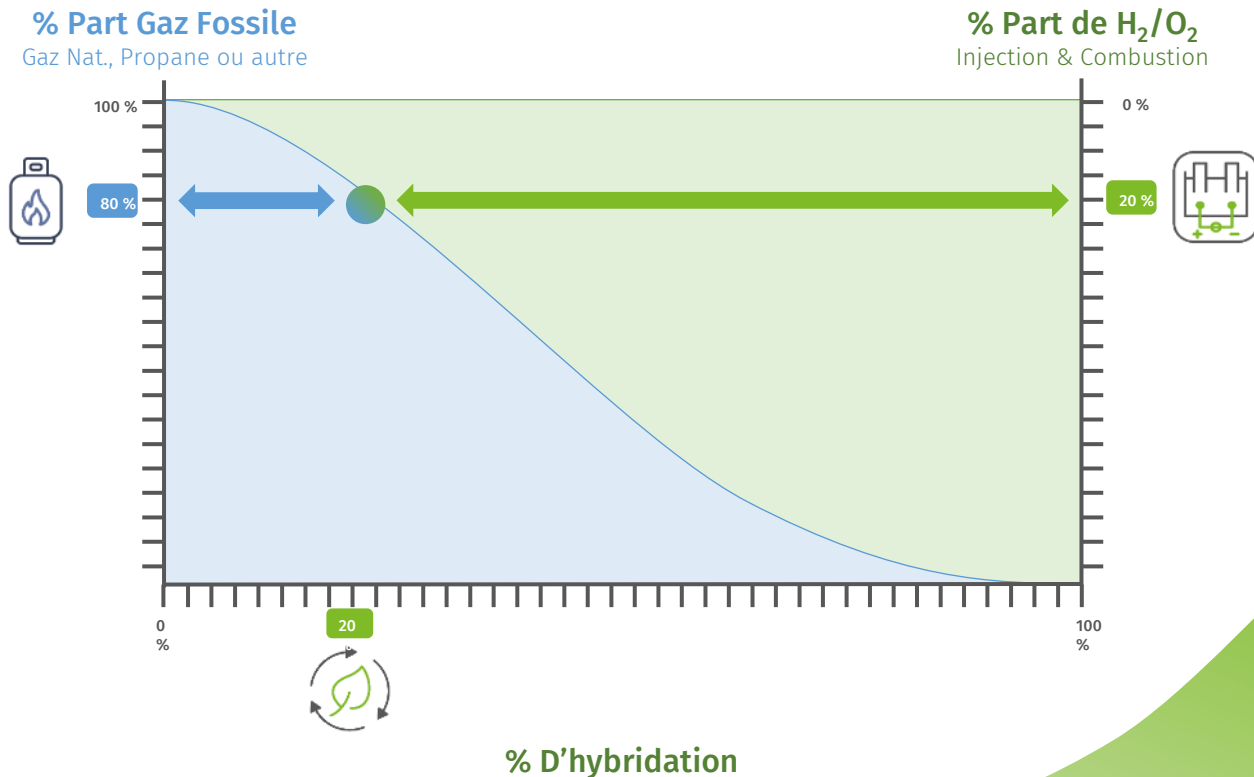


18H10

### Effacement au réseau électrique

L'industriel doit libérer des électrons pour la consommation des particuliers

Son process est alimenté majoritairement en **gaz fossile**





# L'hybridation énergétique | Pilotage flexible et autonome à l'instant T



## Stratégie d'hybridation dynamique & en temps réel



22H30

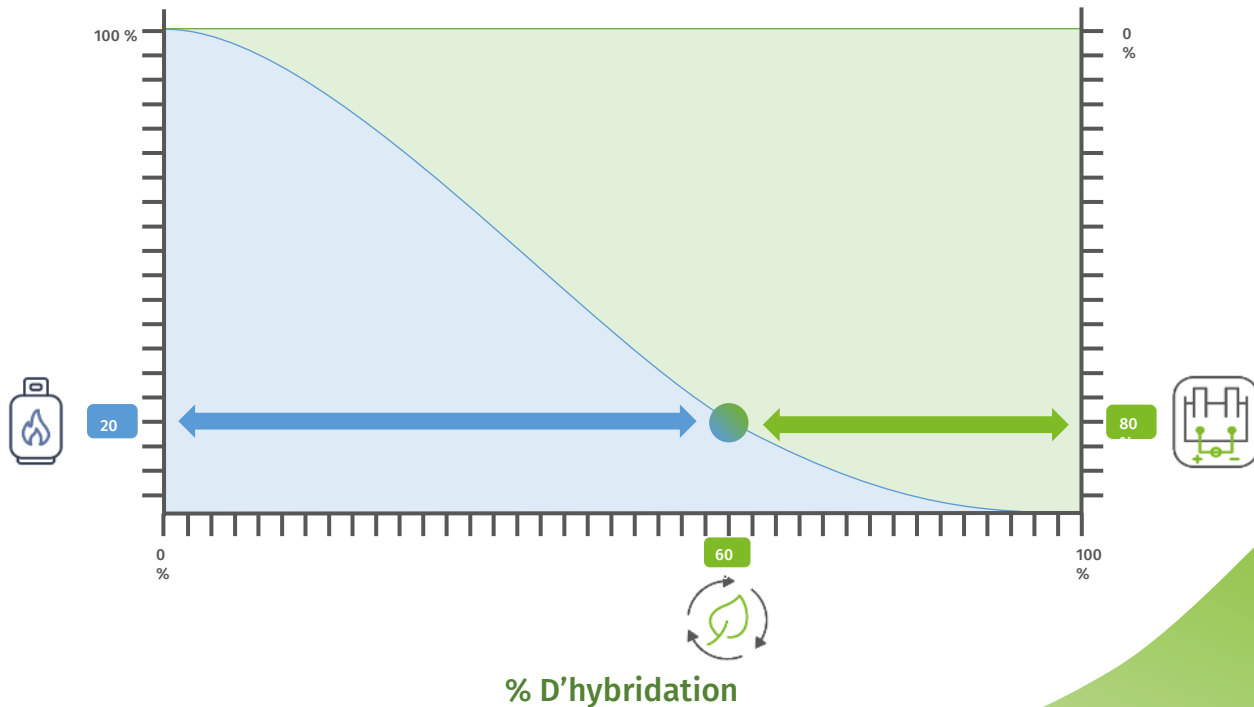
### Disponibilité des électrons

L'industriel peut tirer sur le réseau électrique et diminuer sa consommation de gaz fossile

Son process est alimenté majoritairement en **Hydrogène**

**% Part Gaz Fossile**  
Gaz Nat, Propane ou autre

**% Part de H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>**  
Injection & Combustion





# Value Proposition | LP2H (Local Power to Heat) for Hybrid Heating Process



Exploit the best energy combination: gas AND electricity. Instead of either one or the other.

Resilience

Decarbonization

Competitiveness

Compatibility

Adaptability

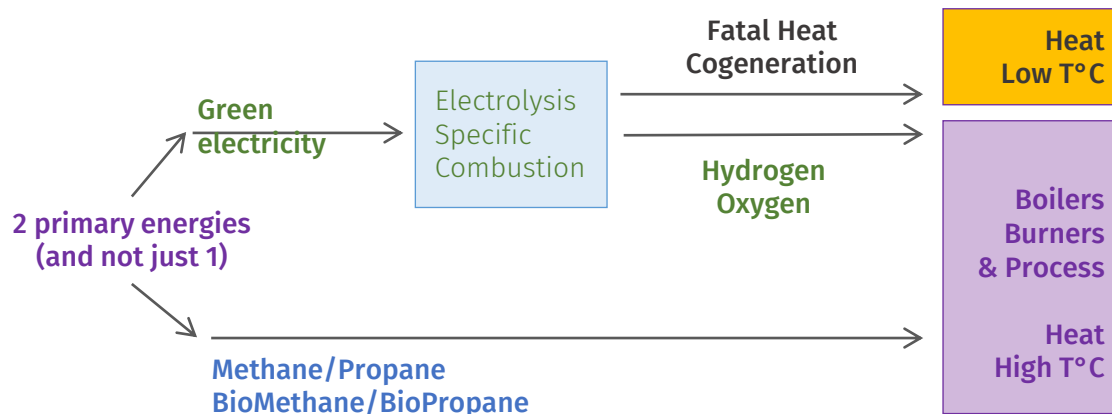
Progressivity

Smoothness/Adjustment

Tradition/Flame



## Principle of "energy combination" through hybridization



LP2H > Innovative & Resilient Hydrogen Functionality



# Proposition de valeur | Rendements = Compétitivité Hydrogène



## Compétitivité Hydrogène grâce à la Technologie LP2H de

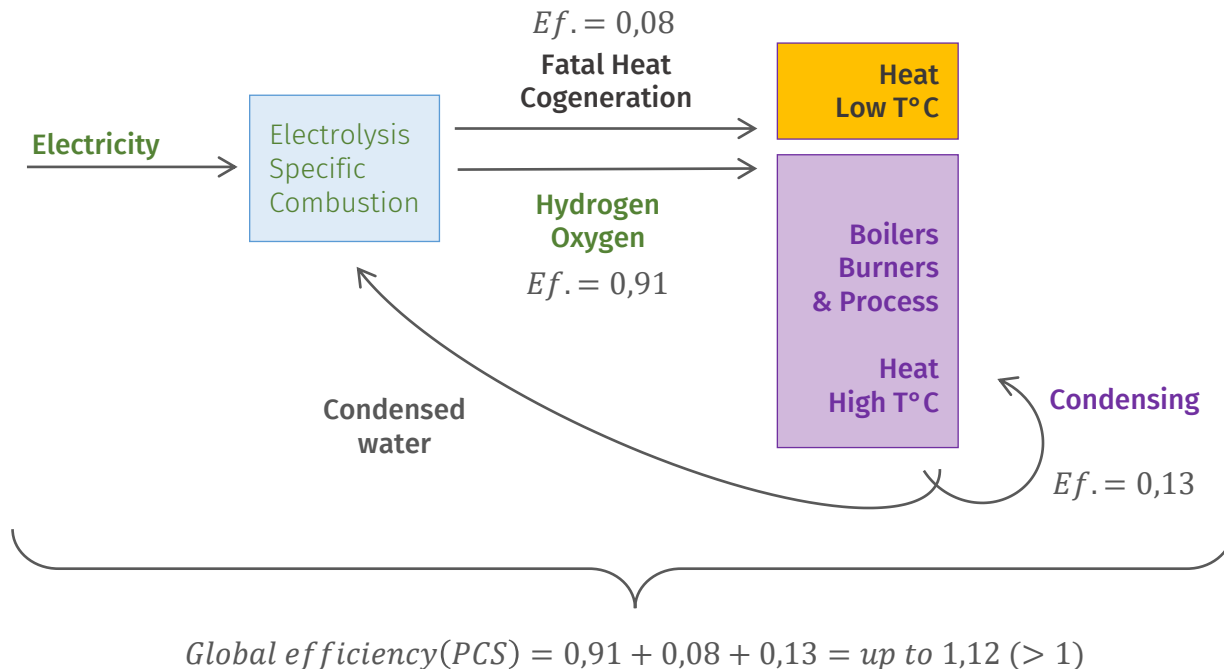
LP2H > Probably one of the best Business Model, based on a global high-efficiency rate

The principal handicap is the (over)cost of electricity, but NOT the efficiency

This is rare & unique for hydrogen uses

Guarantee of optimal hydrogen business models/cases

Business model can be : Energy + Markup (Bulane)



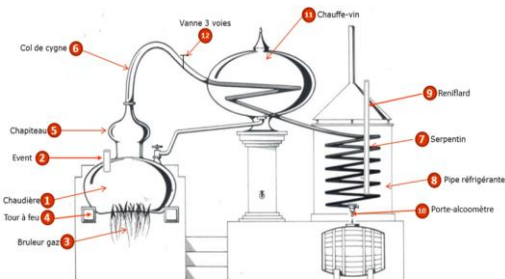
**Bulane LP2H > Rendement de conversion Electrique-Thermique proche 100%**  
1kWh Electrique consommé (électron) = 1kWh Thermique délivré (e-gaz)



# Industrie | Procédés Thermiques & Chauffe industrielle



Un 1<sup>er</sup> UseCase prestigieux et à fort potentiel, le COGNAC



**dyomix**<sup>®</sup>  
technology



Projet HyD2 – Présenté au congrès 2023



## Notre positionnement

Bulane se positionne comme

### L'Expert de la combustion hydrogène

Ce positionnement est permis grâce à une **double expertise** métier/technologie (électrolyse & combustion hydrogène)

Cela lui permet de **maitriser toutes les étapes de la chaine de combustion hydrogène** (de la génération de l'hydrogène jusqu'à son utilisation)

Bulane a été **pionnière de la combustion hydrogène**. Son positionnement est innovant et unique dans la filière hydrogène européenne



The Hydrogen Combustion Company  
Since 2009



**35**  
Collaborateurs



**20 postes**  
Ouverts pour 23/24



**+ de 1800**  
Électrolyseurs  
déployés



Présence dans  
**+ de 20**  
pays



**5 MW**  
De puissance  
déployée



**Décarbonation** des combustions industrielles  
grâce à **l'hydrogène**



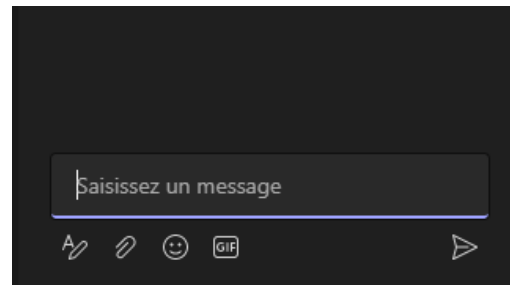
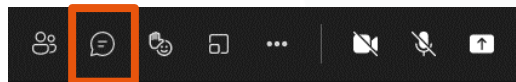
The Hydrogen Combustion Company  
Since 2009



**Nicolas JEREZ**  
**CEO**



# Posez vos questions !





fives



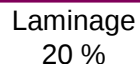
# DÉVELOPPENT DE BRÛLEURS CAPABLES DE FONCTIONNER DE 0 À 100 % D'HYDROGÈNE

Sébastien Caillat  
**Fives Stein**

---

Webinaire Alliance Alice

28/05/2024



# ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> LORS DU TRAITEMENT DE D'ACIER

## Fours de réchauffage

- L'acier doit être chauffé jusqu'à 1250 °C par 36 brûleurs ou plus (1 à 6 MW chacun).
- Un four de 450 t/h émet plus de **280 kt de CO<sub>2</sub>/an** (environ 28 000 ménages européens).

## Lignes de traitement (recuit / galvanisation)

- Jusqu'à 90 brûleurs à flamme directe (450 kW) dégraissent, désoxydent et oxydent partiellement la bande.
- Jusqu'à 700 tubes radiants (100 à 180 kW) chauffent la bande métallique à 900 °C ou plus.
- Émissions peuvent atteindre jusqu'à **65 kt CO<sub>2</sub>/an**



Four de réchauffage

**Industrie sidérurgique : environ 7 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>**

# DIMINUTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

## Stratégie de Fives Stein

- **Amélioration de l'efficacité thermique:** air jusqu'à 650 °C, réduction de l'excès d'air, réduction des fuites d'air, chargement à chaud, etc.  
=> Réduction de la consommation de 15 à 20 %.
- **Enrichissement en oxygène par lances** jusqu'à 40 % d'O<sub>2</sub> dans le mélange  
=> Consommation diminue de 10 à 20 %.
- **Combustion d'hydrogène renouvelable**
  - Développement de brûleurs compatibles de 0 à 100 % d'H<sub>2</sub>
  - Tests en centre d'essais 2023/2024
  - Tests industriels en 2025 four CELSA 3 à Barcelone.
- *Électrification ?*

# COMPARAISON MÉTHANE / HYDROGÈNE

| Paramètre\Combustible                    | Unité                            | Méthane         | Hydrogène      |
|------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------|
| Formule                                  | -                                | CH <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> |
| PCI                                      | MJ/kg                            | 50              | 120            |
| PCI                                      | MJ/Nm <sup>3</sup>               | 35.7            | 10.7           |
| Masse volumique                          | kg/Nm <sup>3</sup>               | 0.72            | <b>0.09</b>    |
| Vitesse laminaire de combustion maximale | m/s                              | 0.37            | <b>2.91</b>    |
| Température adiabatique de flamme        | °C                               | 1950            | 2110           |
| Température minimale d'auto-inflammation | °C                               | 630             | 520            |
| Volume d'air stœchiométrique             | Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> | 9.6             | 2.4            |
| Volume de fumés stœchiométrique          | Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> | 10.6            | 2.9            |
| Ex. : 10 MW / lambda 1.1                 |                                  |                 |                |
| Combustible                              | Nm <sup>3</sup> /h               | 1005            | 3340           |
| Air                                      | Nm <sup>3</sup> /h               | 10 580          | 8 790          |
| Fumées                                   | Nm <sup>3</sup> /h               | 11 585          | 10 460         |

*Disclaimer: This project is co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Research Executive Agency (ERA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*

## Objectifs

- Remplacer le gaz naturel par l'hydrogène comme combustible dans les fours de réchauffage du secteur sidérurgique.
- Développer un jumeau numérique pour contrôler le comportement du four et optimiser les opérations.

## Partenaires

- Celsa Group (Coordinateur) & Celsa Barcelona (Espagne)
- Fives Stein (France) & Fives Steel Spain SA (Espagne)
- RWTH Aachen University (Allemagne)
  - Dpt for Industrial Furnaces & Heat Engineering
  - Chair of ceramics
- Barcelona Supercomputing Centre (Espagne)
- Nippon Gasses (Espagne)
- Oulu University (Finlande)
- Calderys Iberia (Espagne)
- Swerim AB (Suède)
- SSAB AB (Suède)

Durée : 54 mois (02/2023 - 07/2027)

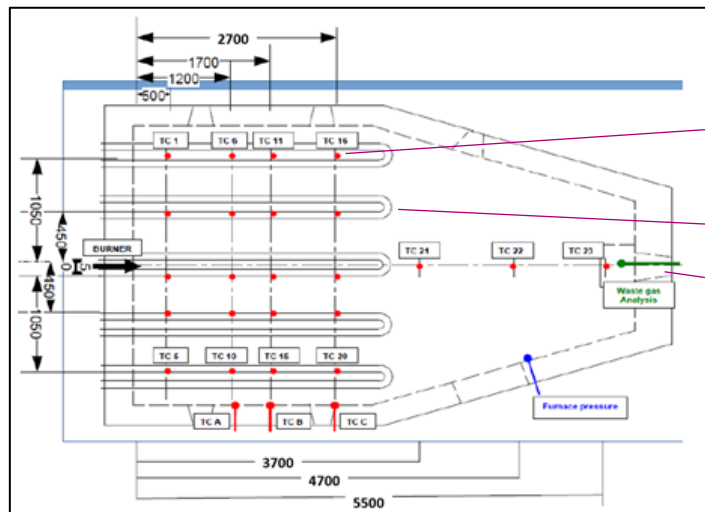
Budget total 8,6 M€ : 50 % cofinancé par RFCS (4,3 M€)



# FOUR D'ESSAIS FIVES STEIN



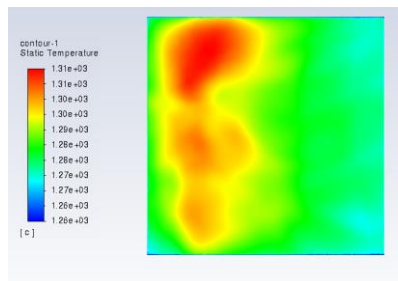
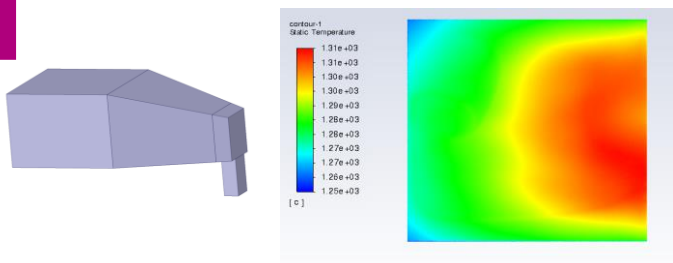
- Capacité maxi: 1.4 MW
- Température d'air : jusqu'à 600 °C
- Gaz naturel & hydrogène
- 26 thermocouples pour la température de voute
- Charge refroidie à l'eau
- Analyse des fumées



# MODÉLISATIONS & PREMIERS RÉSULTATS



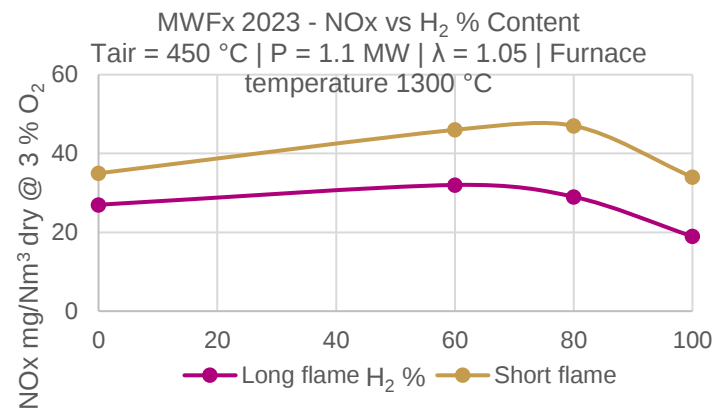
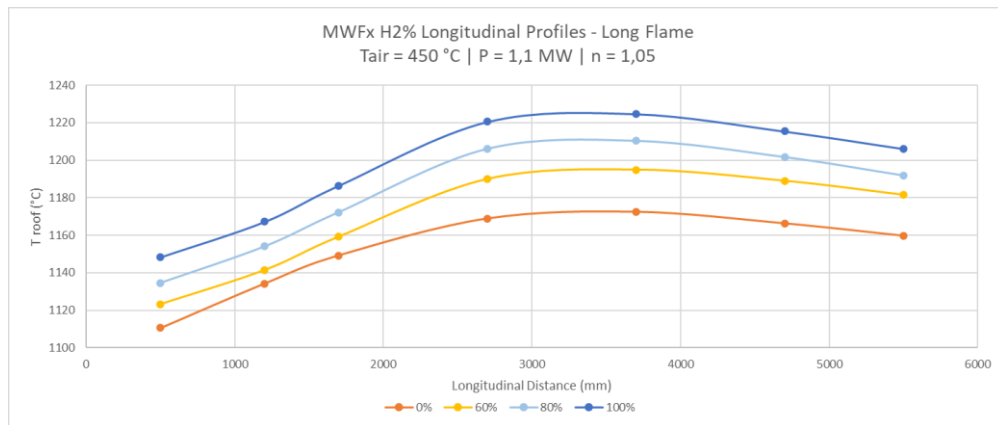
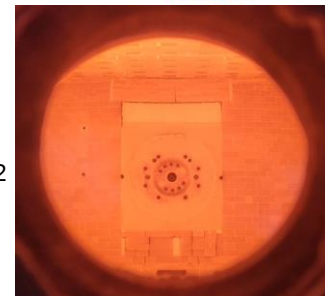
fives



Comparaison flamme longues & courtes

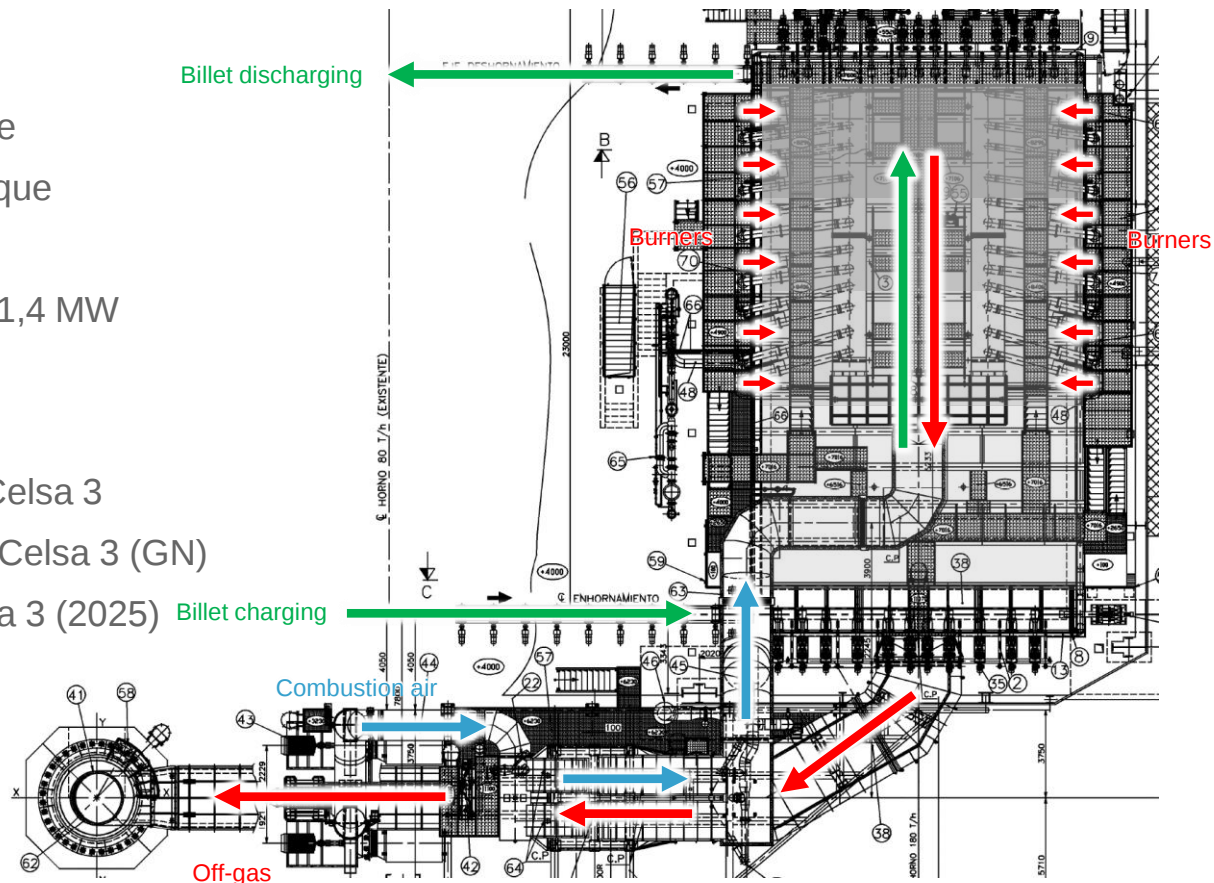


H<sub>2</sub>



# PROCHAINES ÉTAPES – PROJET TWINGHY

- Qualification four tests réfractaire
- Qualification four test métallurgique
- Essais second version brûleurs 1,4 MW
- Extrapolation brûleur à 4 MW
- HAZOP installation hydrogène Celsa 3
- Mesures de références sur four Celsa 3 (GN)
- Implantation 8 brûleurs sur Celsa 3 (2025)
- Jumeaux numériques





**Sebastien.Caillat@fivesgroup.com**

Fives Stein - Steel

[www.fivesgroup.com](http://www.fivesgroup.com)

# PHASE 2 – ETUDES DE CAS

**Méthodologie des études de cas**

**Etude de cas d'un sécheur rotatif - chimie**

**Etude de cas d'un four de fusion - métallurgie**

**Etude de cas d'un four tuiles et briques - matériaux**

# Méthodologie des études de cas

*Approche et hypothèses communes*

Définition du cas  
de référence

Définition du cas  
d'hybridation

Modélisation et  
analyse des  
résultats

## Hypothèses communes :

- Poids carbone : Base ADEME  
France 2022

| Vecteur énergétique | Poids carbone               |
|---------------------|-----------------------------|
| Electricité         | 52 gCO <sub>2</sub> eq/kWh  |
| Gaz naturel         | 239 gCO <sub>2</sub> eq/kWh |

# Méthodologie des études de cas

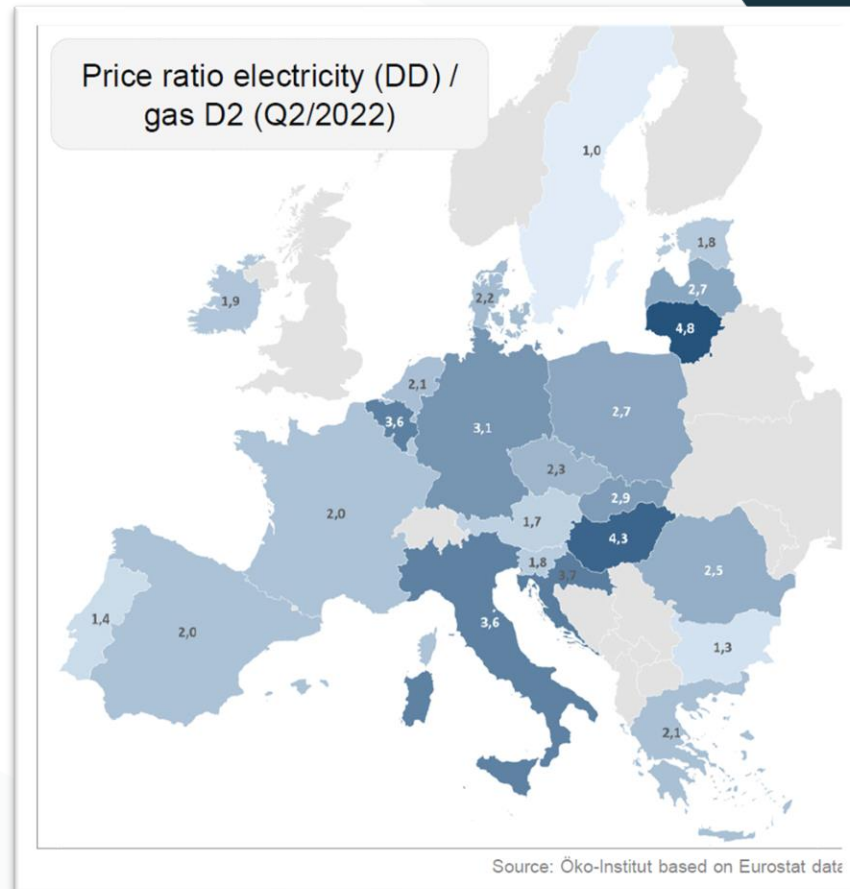
## *Hypothèses sur les prix de l'énergie*

### Hypothèses communes :

- Coût de l'énergie : 3 scénarios qui se basent sur les tendances observées dans 3 pays européens

| Scénario       | Prix du gaz *<br>€/MWh | Prix de l'elec*<br>€/MWh |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| S1 – France    | 50                     | 100                      |
| S2 – Allemagne | 70                     | 215                      |
| S3 - Portugal  | 80                     | 110                      |

*\* Les prix de l'énergie incluent toutes les taxes associées, dont la taxe carbone*



# Phase 2 : Etude de cas sécheur rotatif hybridé avec une PAC

## Définition du cas de référence

| PRODUIT                  |             |
|--------------------------|-------------|
| Débit traité             | 3 500 kg/h  |
| Humidité relative entrée | 50%         |
| Humidité relative sortie | 3,5%        |
| AIR DE SECHAGE           |             |
| Débit                    | 25 000 kg/h |
| Température entrée       | 24°C        |
| Humidité entrée          | 40%HR       |
| APPORTS THERMIQUES       |             |
| Gaz                      | 1 500 kW    |
| Récupération de chaleur  | 300 kW      |

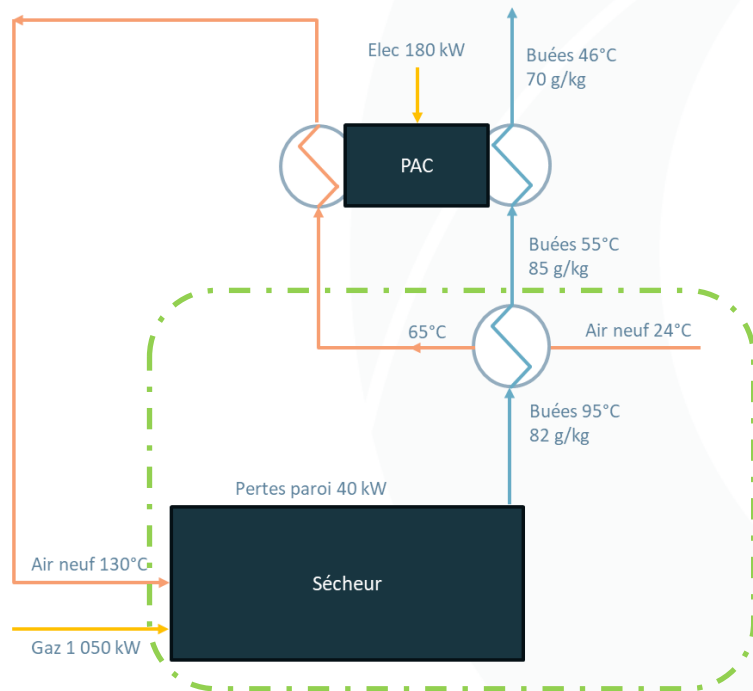


### Sécheur rotatif

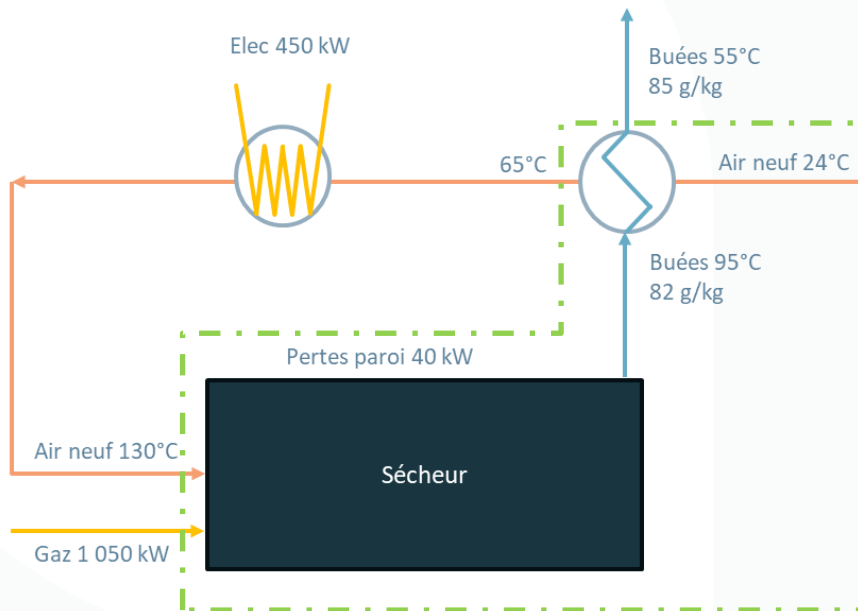
- > Séchage d'engrais
- > Brassage dans le tambour par rotation du cylindre
- > Hypothèses de fonctionnement 7500h/an

# Phase 2 : Etude de cas sécheur rotatif hybridé avec une PAC

## Définition du cas d'hybridation



**Cas 1 :** valorisation des buées avec une PAC



**Cas 2 :** hybridation elec sans valorisation des buées

# Phase 2 : Etude de cas sécheur rotatif hybridé avec une PAC

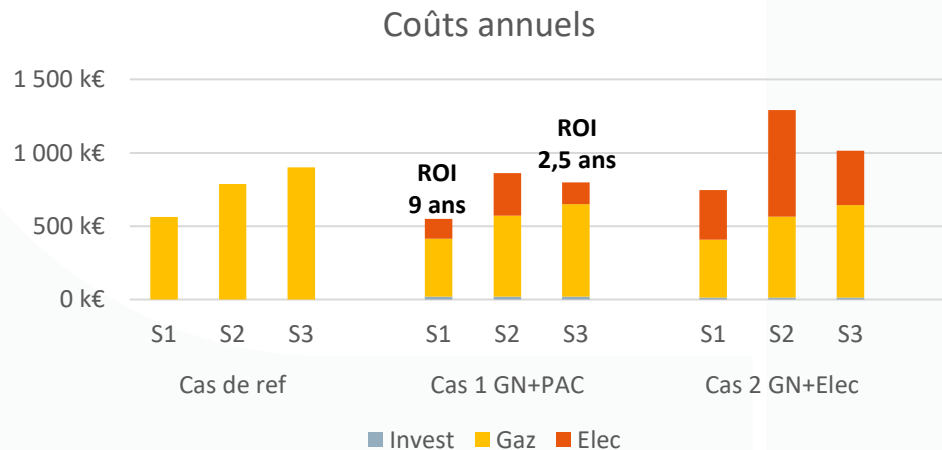
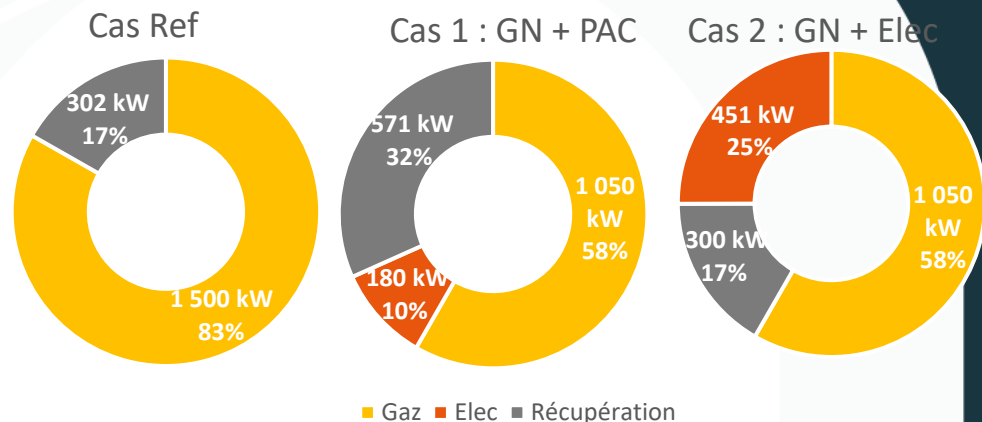
## Analyse des résultats

### Hypothèses

- > Durée de vie des équipements de 15 ans
- > COP de la PAC de 2,5

| Donnée        | Cas de Réf. :<br>Combustion<br>100% GN | Cas 1 :<br>GN+Elec<br>PAC | Cas 2 :<br>GN+Elec |
|---------------|----------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Part d'hyb.   | 0%                                     | 15%                       | 30%                |
| Elec (GWh/an) | 0,00                                   | 1,35                      | 3,38               |
| Gaz (GWh/an)  | 11,25                                  | 7,88                      | 7,88               |
| Invest k€     | 0                                      | 600*                      | 200                |
| Émission CO2  | 2 689                                  | 1 952                     | 2 058              |
| CO2 évitées   | NA                                     | 736                       | 631                |
| IPE (kWh/t)   | 3,54                                   | 2,86                      | 3,44               |

\* On suppose un financement à hauteur de 50% du projet



## Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H<sub>2</sub>

- Exemple d'un four métallurgique de fusion d'aluminium
  - Industries automobile / aéronautique / fonderies
  - Charge par batch
  - Four de grande puissance → plusieurs MW
  - Conservation des capacités de production
  - Nécessité de montée en température rapide
    - La combustion gaz permet un chauffage rapide
  - Electrification complexe
    - Coût important → Changement du four
  - Contrainte économique
    - Amortissement du four à durée de vie très longue

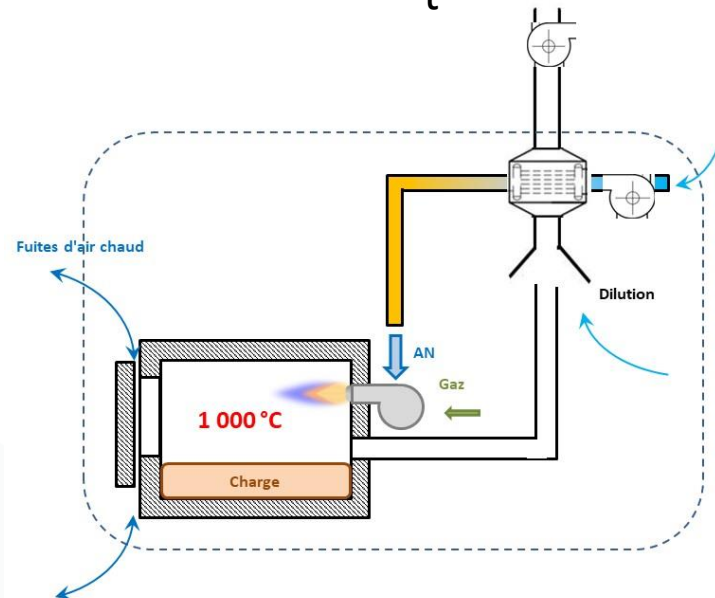
## Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

- Illustration d'un four type



Puissance  
gaz

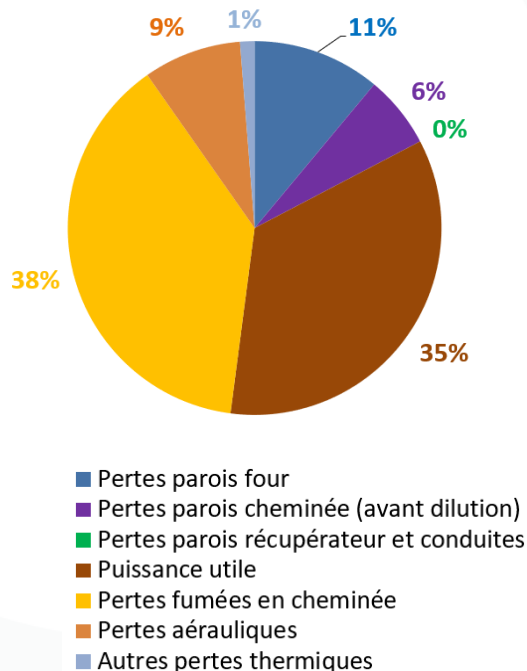
t



## Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

- Caractéristique de fonctionnement
  - Puissance de chauffe installée 8 MW
  - Puissance moyenne 4 MW
  - Rendement 35 %
  - Débit de matière 7 t/h
  - IPE 610 kWh/t
- Hypothèse : rendement constant
  - Débit fumées → avec le taux H2 ↗
  - Cp fumées ↗ avec le taux H2 ↗

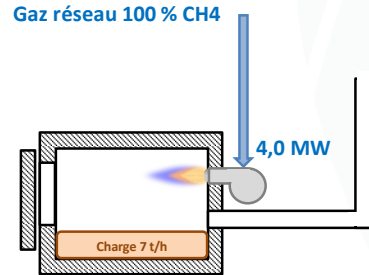
BILAN ENERGIE



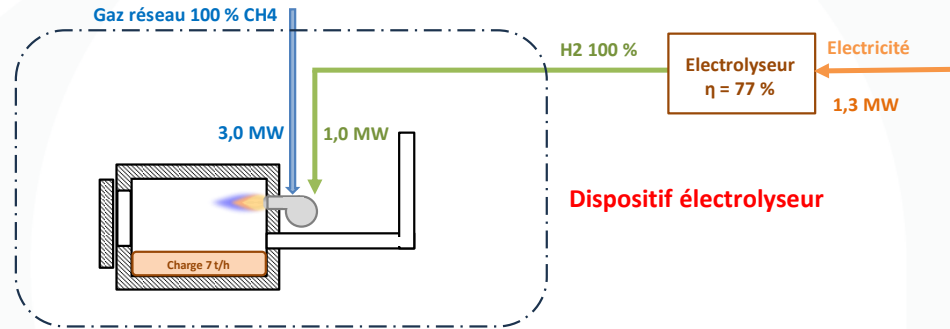
# Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

- Schémas des cas simulés
- Fonctionnement hybridé en mode continu

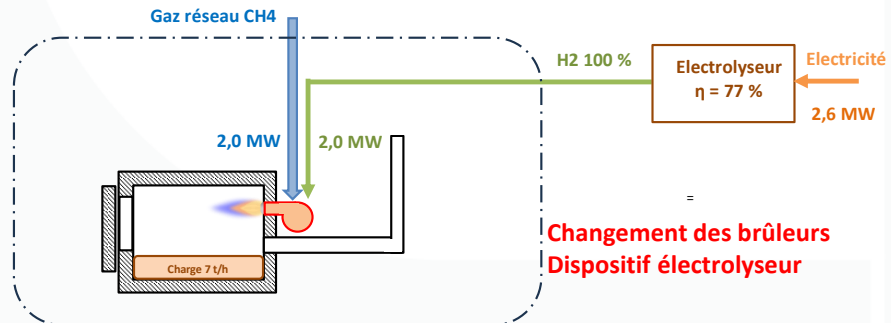
Cas base : Gaz réseau 100 % CH<sub>4</sub>



Cas 1 : Double réseau + électrolyseur externalisé - Fourniture H<sub>2</sub> 25 % sur 7500 heures/an



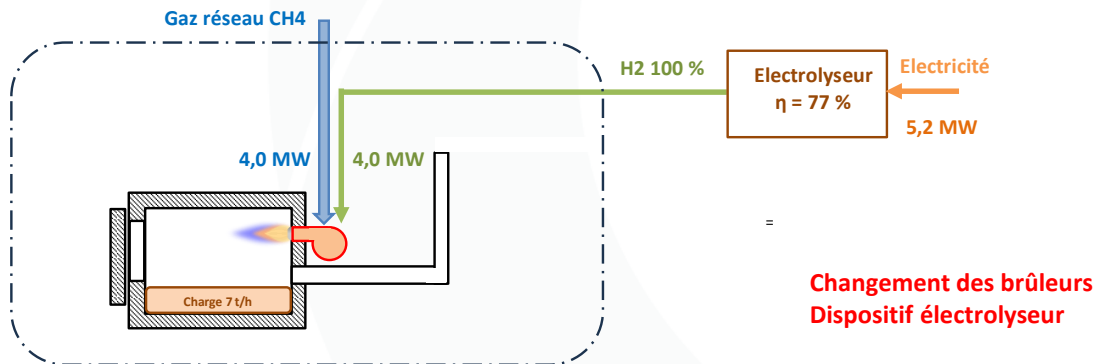
Cas 2 : Double réseau + électrolyseur externalisé - Fourniture H<sub>2</sub> 50 % sur 7500 heures/an



## Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

- Fonctionnement en mode discontinu ou basculement saisonnier en H2

Cas 3 : Double réseau + électrolyseur externalisé - Fourniture H2 100 % sur 500 heures/an (Coût élec bas)



# Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

## Hypothèses de calcul

- Consommation annuelle du four 33 GWh/an → (7500 h/an)
- Coûts des énergies → Scénario 1 France
  - Ratio Elec / Gaz : 2,0
  - Coût du gaz naturel : 50 €/MWh
  - Coût de l'électricité : 100 €/MWh
    - $\eta$  électrolyseur 77 % et 22 % de marge → Coût H2 induit 158 €/MWh
  - Coût de l'H2 : 158 €/MWh → soit 4,8 €/kg H2
  - Coût de la tonne de CO2 : 80 €/t
  - Investissement lissé sur 30 ans

## Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

| Combustible                |                      | GN (CH4)    | Hybridation GN + H2                      |                                          |                                                            |
|----------------------------|----------------------|-------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Technique d'hybridation    |                      | -           | Fourniture mélange GN + H2 sur 7500 h/an | Fourniture mélange GN + H2 sur 7500 h/an | Fourniture GN 100 % sur 7000 h/an<br>H2 100 % sur 500 h/an |
| Taux d'hybridation         |                      | -           | 25 % H2<br>75 % GN                       | 50 % H2<br>50 % GN                       | 7 % H2                                                     |
| Coût du GN                 | €/MWh <sub>pcs</sub> | 50          | 50                                       | 50                                       | 50                                                         |
| Coût H2                    |                      | 50          | 158                                      | 158                                      | 52                                                         |
| Coût énergie               | k€/an<br>€/tonne     | 2 295<br>42 | 3 109<br>57                              | 3 918<br>72                              | 2 338<br>43                                                |
| Emission CO2               | t/an<br>%            | 7 943<br>0  | 6 560<br>-17                             | 5 123<br>-35                             | 7 581<br>-5                                                |
| Adaptation brûleur         | k€                   | -           | 0                                        | 100                                      | 100                                                        |
| Adaptation ligne gaz       | k€                   | -           | 100                                      | 100                                      | 100                                                        |
| <b>Investissement</b>      | <b>k€</b>            | -           | <b>100</b>                               | <b>200</b>                               | <b>200</b>                                                 |
| Financement 50 %           | k€                   | -           | 50                                       | 100                                      | 100                                                        |
| Coût supplémentaire annuel | k€/an<br>%           | -<br>-      | 815<br>26                                | 1 626<br>41                              | 46<br>2                                                    |

# Phase 2 : Etude de cas four métallurgique hybridé H2

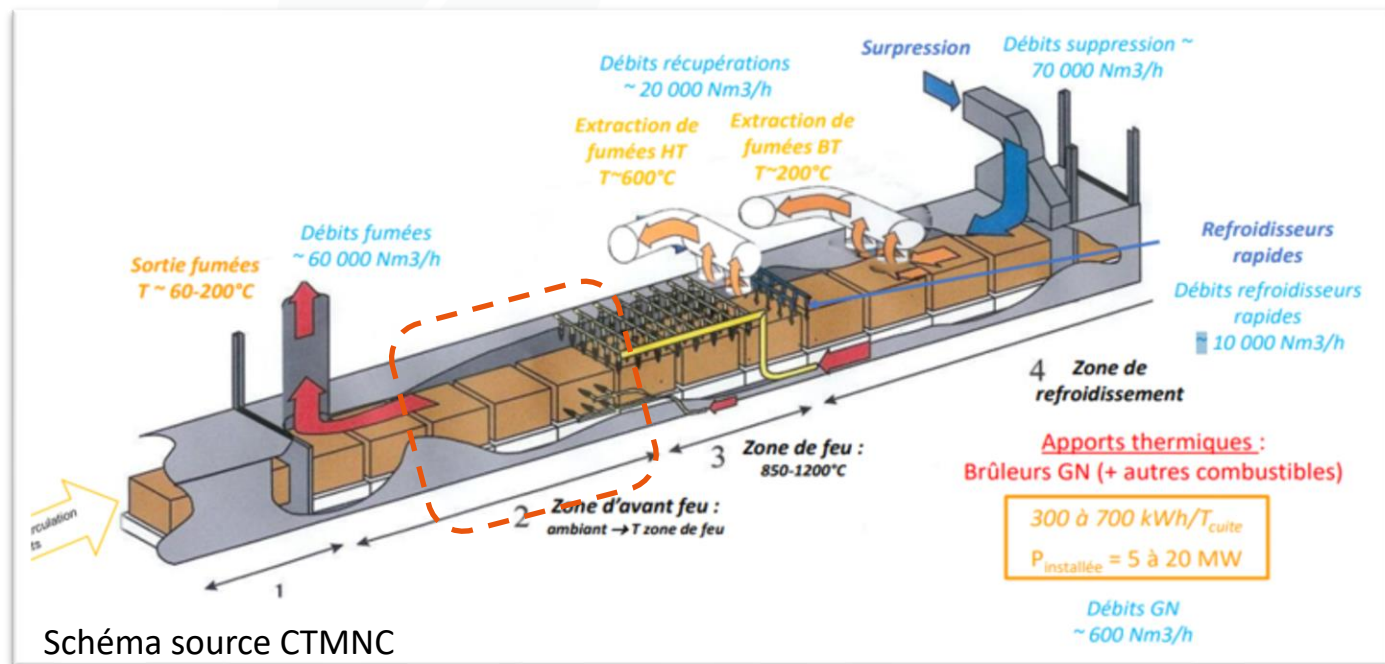
## Commentaires

- Les coûts énergétiques actuels ne permettent pas une rentabilité économique immédiate
  - Coût des énergies faibles
  - Taxe carbone peu élevée
- La solution en mode basculement 100 % H2 atteint le seuil de rentabilité mais le taux de baisse d'émission de CO2 est faible -5 %
- Avec 50 % d'H2 → 35 % d'émission en moins soit -2 820 t/an
- En mode injection continu si H2
  - < 25 % pas de changement de brûleur
  - > 25 % changement de brûleur
- 1 MWc → 6 000 m<sup>2</sup> de PV → 1 GWh/an d'H2 soit -3 % d'émissions de CO2
  - Investissements : Champ de PV + Electrolyseur + Brûleur et ligne

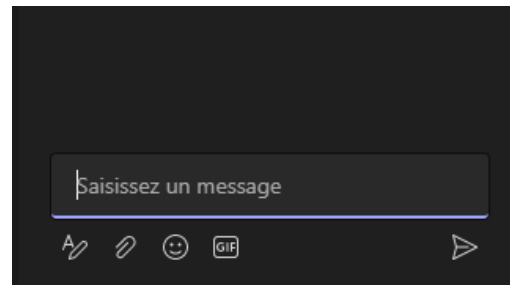
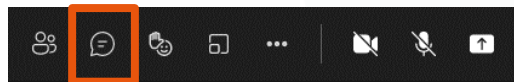
## Phase 2 : Etude de four tuiles et briques hybridé élec

Hybridation électrique de la zone 2 (avant feu)

Puissance hybridable environ 1/6 de la puissance du four → température < à 500°C



# Posez vos questions !





# **HYBRIDATION ENERGETIQUE DES PROCEDES DE FUSION DU VERRE**

**OWENS CORNING**

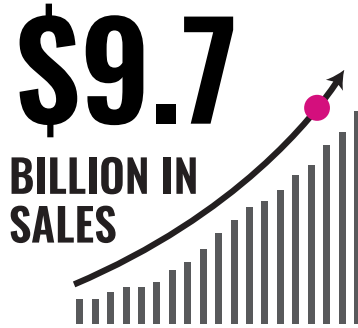
**Webinaire ALLICE – 28 Mai 2024**

**Emmanuel VAQUANT / Etienne ROUX**

# OWENS CORNING AT A GLANCE



CONSECUTIVE YEARS  
AS A FORTUNE® 500  
COMPANY



\*2023  
REVENUE



**18,000**  
EMPLOYEES PLUS 1  
PINK PANTHER



**30**  
COUNTRIES  
WHERE WE  
OPERATE

Serving residential, commercial, and industrial markets

ROOFING | INSULATION | COMPOSITES

# OWENS CORNING COMPOSITES BUSINESS

- Nonwovens operations
- Fabrics operations
- Other glass reinforcements
- Building Elements
- Glass metal services

**5,650**  
EMPLOYEES

**28**  
PLANTS

**15**  
COUNTRIES

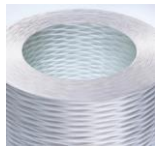
**+5**  
R&D CENTERS



# OC COMPOSITE BUSINESS - WHAT WE MAKE

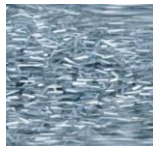
## Owens Corning glass reinforcement products & applications

2023 Composites Business Revenues: \$2,3B



### Continuous Fiber Type 30® single end roving

Chemical and sewage, oil, water processing (pipe and tanks), industrial (high-pressure vessels, pultruded items), wind energy, aerospace, ballistics, transportation (muffler filling), electrical (optical cable)



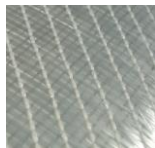
### Chopped strand, wet-use

Building products (roofing and gypsum), industrial specialties



### Chopped strand mat and continuous filament mat

Marine, transportation, recreation, corrosion resistance, construction



### Knitted or woven fabrics

Wind, pipe, thermoplastic composites, industrial, recreational



### Nonwoven veil

Construction, industrial, automotive, road paving



### Continuous fiber multi-end roving

Construction (panels and translucent panels), corrosion resistant pipe and tanks, consumer (sanitary, recreational vehicles), transportation (headliner, body parts, semi-structural parts)

## COMPOSITES



**MATRIX = Resin (PP, PA, Epoxy...)**

**REINFORCEMENT = Fiber (Glass, Carbon, Kevlar...)**



## APPLICATIONS



# OBJECTIF DE DURABILITE POUR OWENS CORNING À 2030 (BASE 2018)



**Réduire de 50% la consommation d'eau dans les usines**



**Zéro déchet mis en décharge**

En réduisant de 50 % la quantité de déchets que nous produisons et en recyclant le reste



**Réduire les émissions de gaz à effet de serre émis par nos usines de 50%**



**HORIZON 1**  
**ENERGY OPTIMIZATION**



**HORIZON 2**  
**ENERGY REDUCTION THROUGH**  
**EQUIPMENT INVESTMENT**

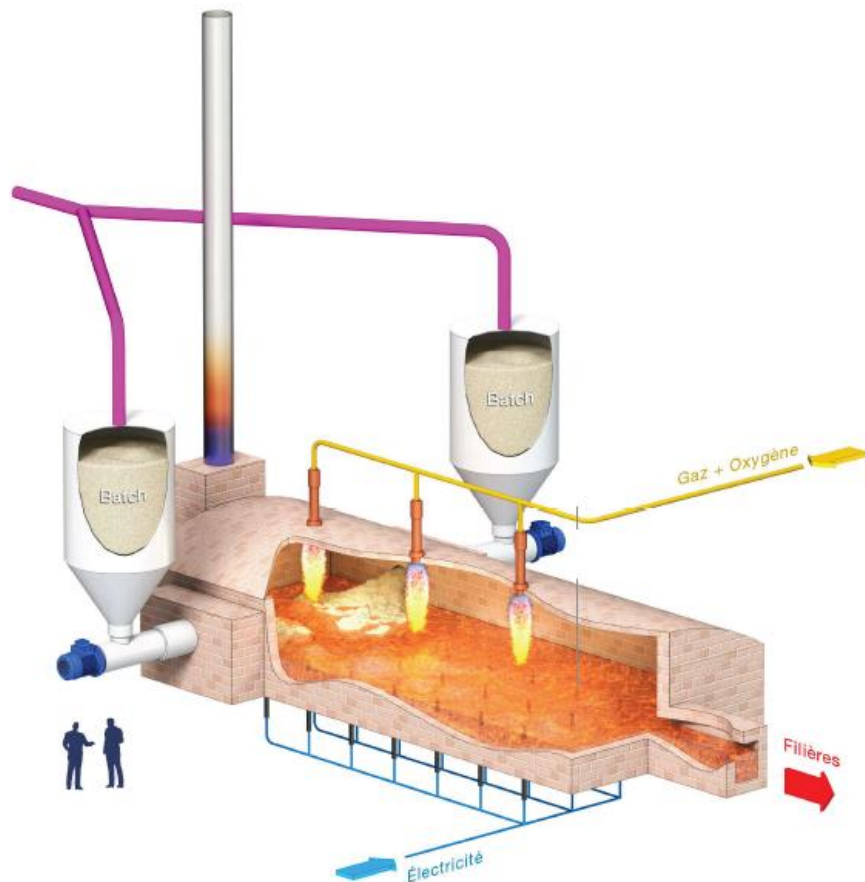


**HORIZON 3**  
**TECHNOLOGY INNOVATION**

**Projet 1:** Fusion du verre par hybridation énergétique CH<sub>4</sub> / Electricité

**Projet 2:** H2GLASS Consortium Hybridation énergétique CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>

# PROCESSUS DE FABRICATION DU VERRE DE RENFORCEMENT



## USINE de l'ARDOISE ( GARD - FRANCE )

- 2 Fours
- Production de verre fondu : 80 à 120 Tonnes / jour / four
- Energie de fusion
  - Gaz Naturel + Oxygène pour la combustion
  - Electricité ( Electrodes immergées dans le bain de verre )
- T° verre ~1400°C
- Température atmosphère ~1600°C
- Emissions de CO2: 7 à 10 Ktons / an / four

## Programme en cours

- **Objectif :** Augmenter la part électrique dans le processus de fusion
- **Enjeux :** +1KW électrique = - 1,4 KW gaz ( - 2,3 Ton CO2 / an )
- **Challenges :**
  - Faible conductivité électrique du verre de renforcement (taux d'alcalins faible  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ... )
  - Intégrité et usures des réfractaires
  - Impact sur les rendements de production

# H2GLASS CONSORTIUM

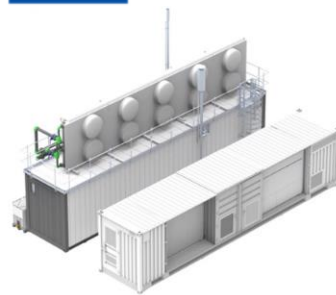


Co-funded by  
the European Union

- **Projet co-financé par l'UE** : 24 millions €
- **Durée** : 2023 - 2026
- **Objectif** : accélérer la décarbonisation de l'industrie du verre en développant et en appliquant l'ensemble des technologies nécessaires à la combustion complète de l'hydrogene dans les installations de production de verre.

- **Acteurs** :

- **5 démonstrateurs industriels** : Steklarna Hrastrnik, Vetrobalsamo, Zignago Vetro, PTML Pilkington et Owens Corning
- **18 institutions industrielles et de recherche hautement qualifiées**:
  - Sintef Industry
  - Stara Glass
  - Sener
  - Stazione Sperimentale del Vetro
  - ....



2,5MW PEM électrolyseur



# H2GLASS CONSORTIUM – TEST COMBUSTION H2

## Phase\_1 : Test avec H2 gris – 200bar trailers

Q4-2024

Usine de l'Ardoise (Gard)

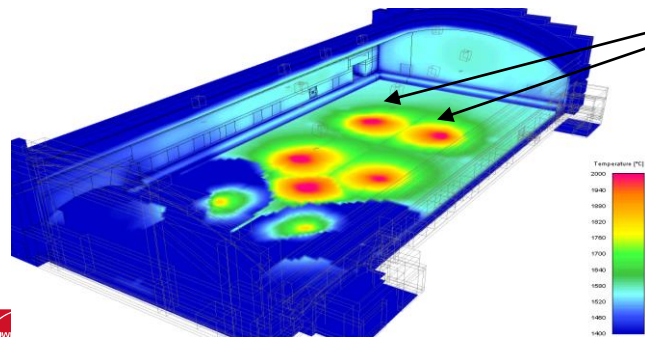
2 semaines d'essais

Débit H2 @650 m3/h

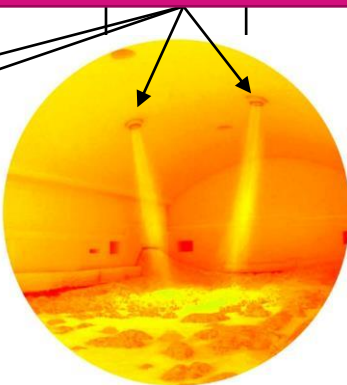


### Objectifs

- Réaliser le premier essai de combustion 100% H2 sur 2 brûleurs du four
- Valider le design du brûleur et les premiers effets court terme sur la qualité du verre



Combustion 100% H2



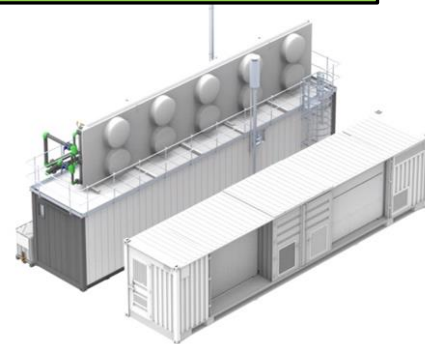
## Phase\_2 : Test avec H2 vert - Electrolyseur

Q3-2025

Usine de l'Ardoise (Gard)

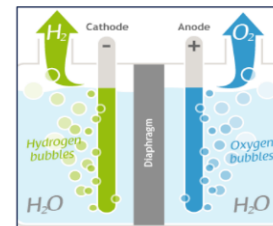
4 mois d'essai

Débit H2 @550 m3/h



### Objectifs

- Etudier l'impact d'une combustion long terme sur les réfractaires et la qualité du verre



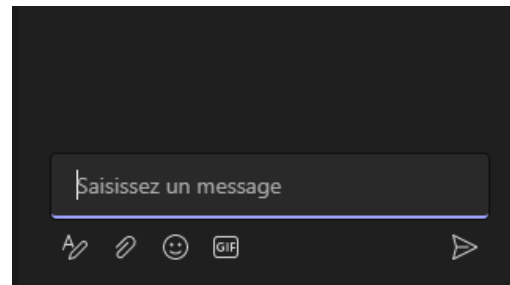
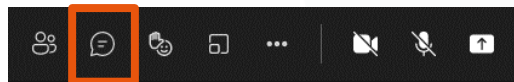
H2 sera produit à partir l'électricité verte en provenance du barrage sur le Rhône situé à proximité



# **HYBRIDATION ENERGETIQUE DES PROCEDES**

**Merci pour votre attention  
Avez-vous des questions ?**

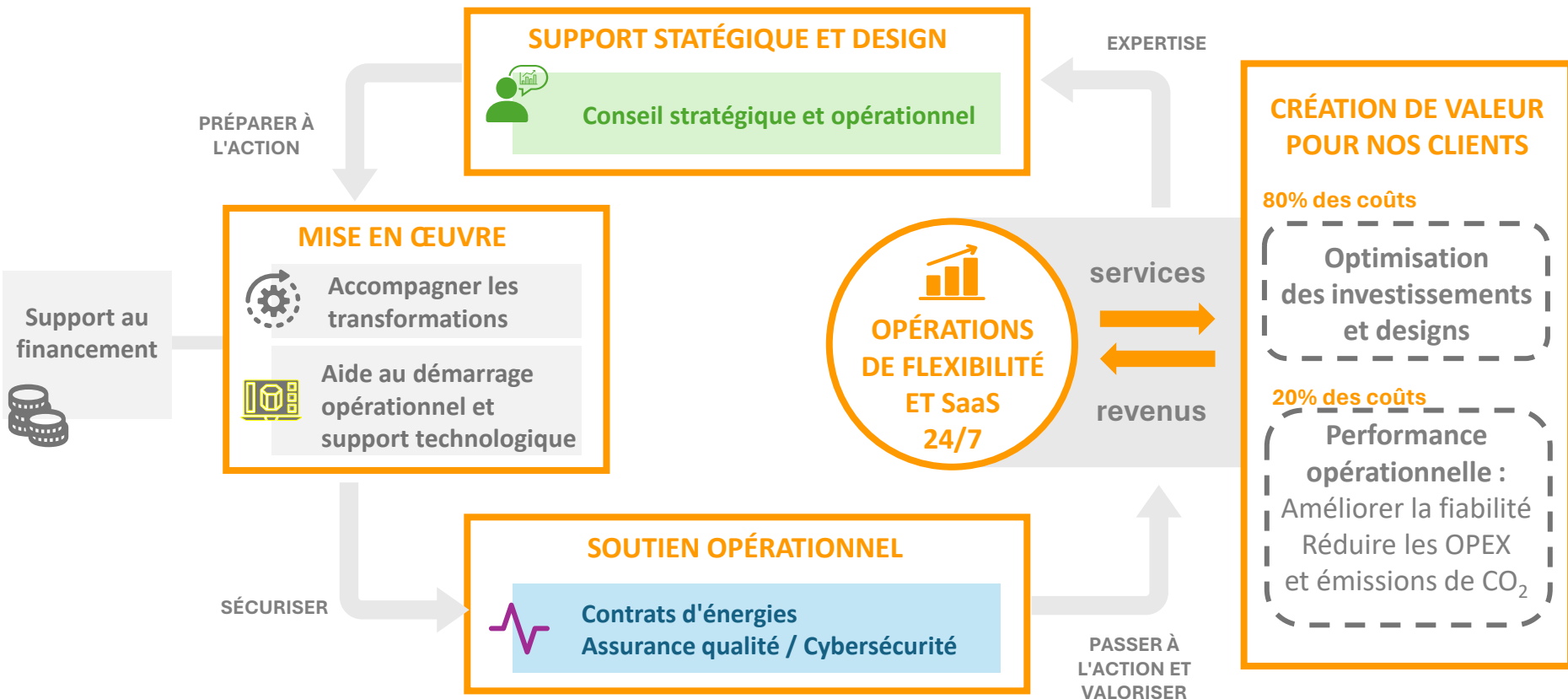
# Posez vos questions !



# Energy Pool - Hybridation et réduction des coûts énergétiques

# Energy Pool : un accompagnement global

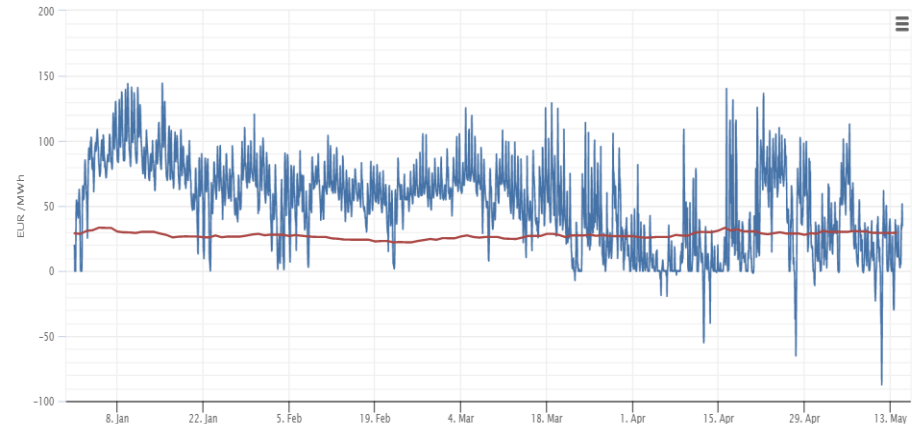
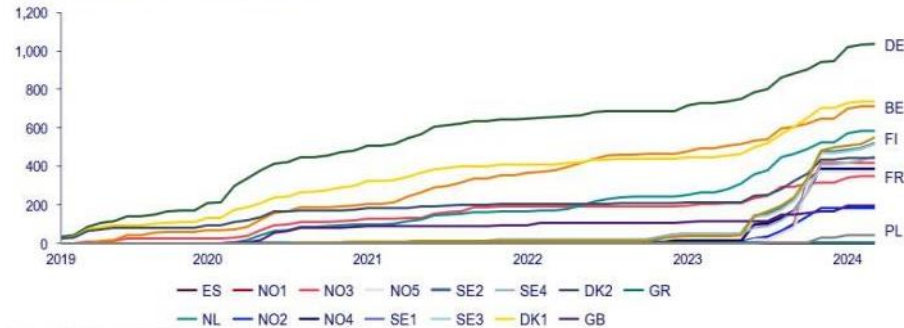
## Expert international et indépendant



Une tendance européenne: les prix négatifs sur les marchés de l'électricité sont plus fréquents au fil des ans.

En France, déjà 200 heures avec **des prix nuls ou négatifs** sur les marchés de l'électricité en 2024.

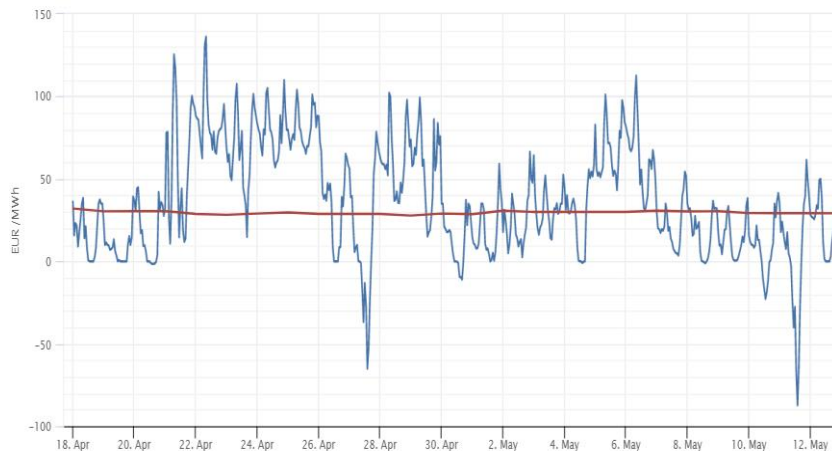
Cumulative total number of negative hours



— Prix électricité (SPOT hour)  
— Prix gaz (PEG)

### Arbitrage marchés énergies

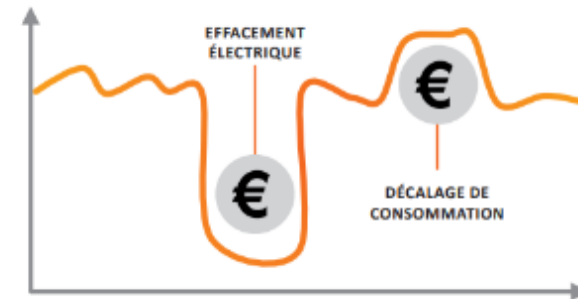
(saisir les meilleurs prix, arbitrer entre plusieurs énergies)



— Prix électricité (SPOT hour)  
— Prix gaz (PEG)

### Participation aux marchés de réserves

(augmenter ou réduire sa consommation d'électricité pour participer à l'équilibrage du système électrique en contrepartie d'une rémunération)



De 30 000 à 200 000€/MW/an

# Fabrication de plaques de plâtre

## Hybridation du sécheur de plaques de plâtre



NOTRE CLIENT

**Activité du site :** Le site est spécialisé dans la fabrication des plaques de plâtre.

**Objectifs de décarbonation :**

Notre client vise **50% de réduction de ses émissions de CO<sub>2</sub> en 2030** et **zéro émissions nettes en 2045**.

- Energy Pool a été sollicité pour **évaluer la faisabilité de l'électrification/hybridation du sécheur des plaques de plâtre**

| Zone 0                                           | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Variations de températures de 75 à plus de 300°C |        |        |        |        |        |        |



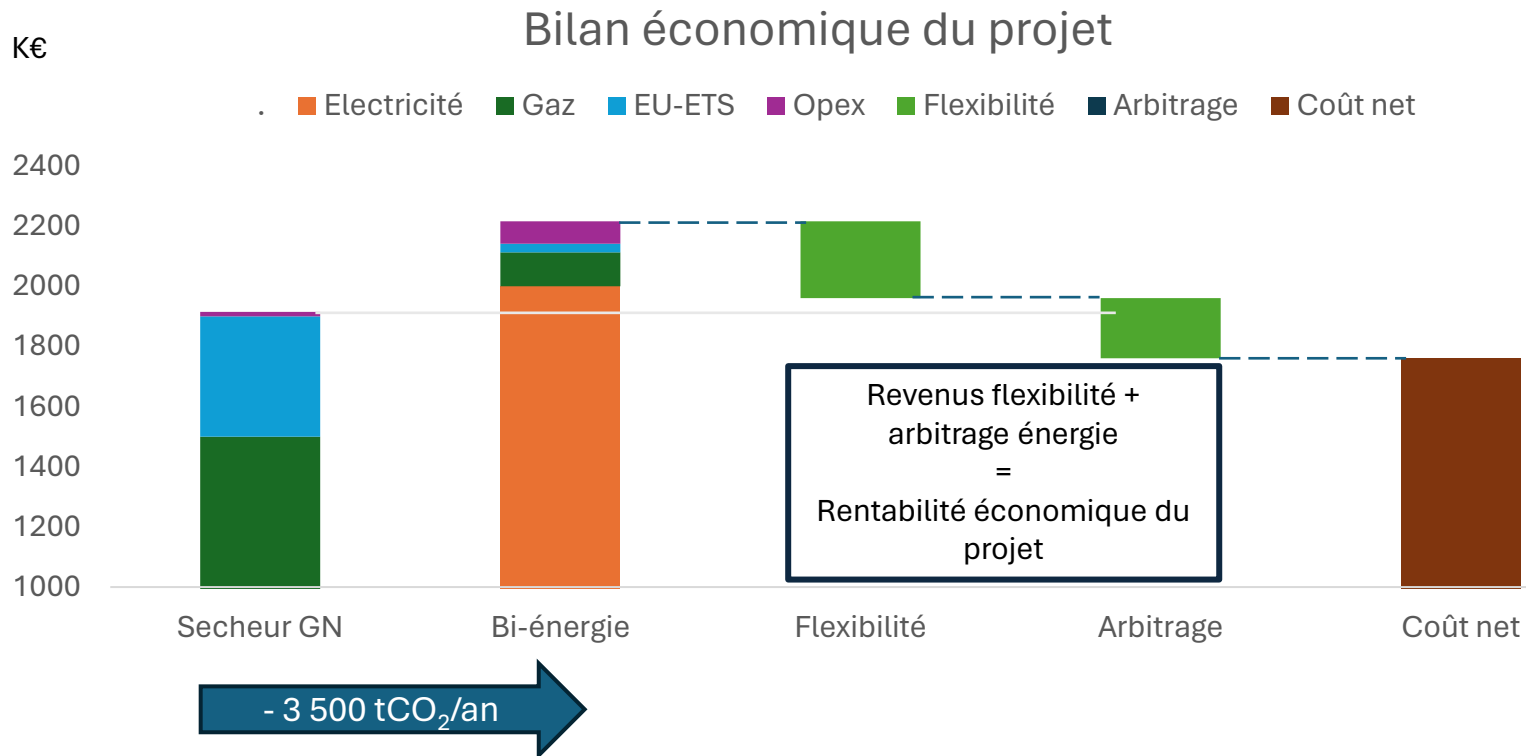
### Introduction dans une zone du four :

- Éléments chauffants en inox
- Rendement: 98%
- Facilement démontable pour la maintenance

- Électrification d'une zone spécifique du sécheur :**
  - > Puissance disponible sur le réseau Enedis pour l'électrification: **3 MW**
  - > Solution technique: **batterie électrique** pour le chauffage de l'air
  - > Possibilité d'**arbitrage gaz/électricité** pour la zone

# Fabrication de plaques de plâtre

## Hybridation du sécheur de plaques de plâtre



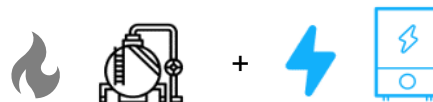
**Chaudière gaz – situation  
actuelle**



**Option 1:**  
**Chaudière électrique  
seule**



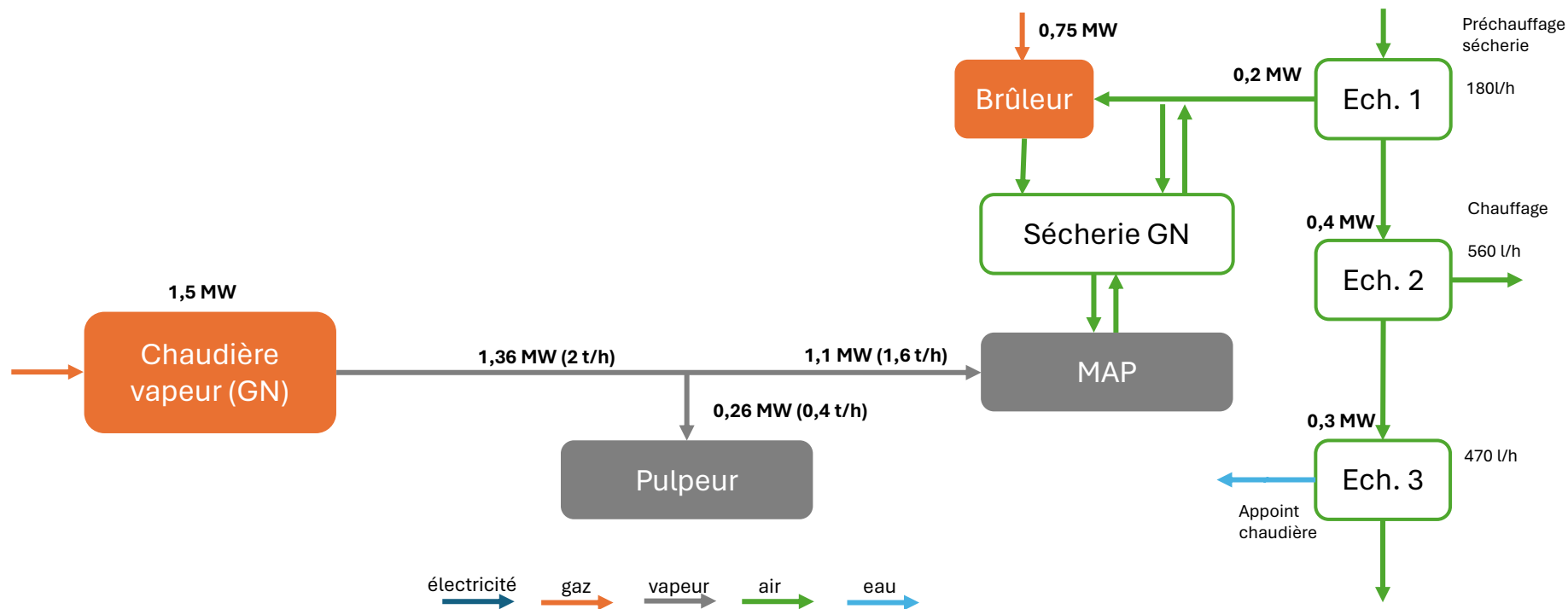
**Option 2:**  
**Chaudière gaz  
existante  
+  
Chaudière électrique**



**Option 3:**  
**Chaudière électrique  
+  
stockage thermique  
(TES)**



## Configuration initiale de production de vapeur

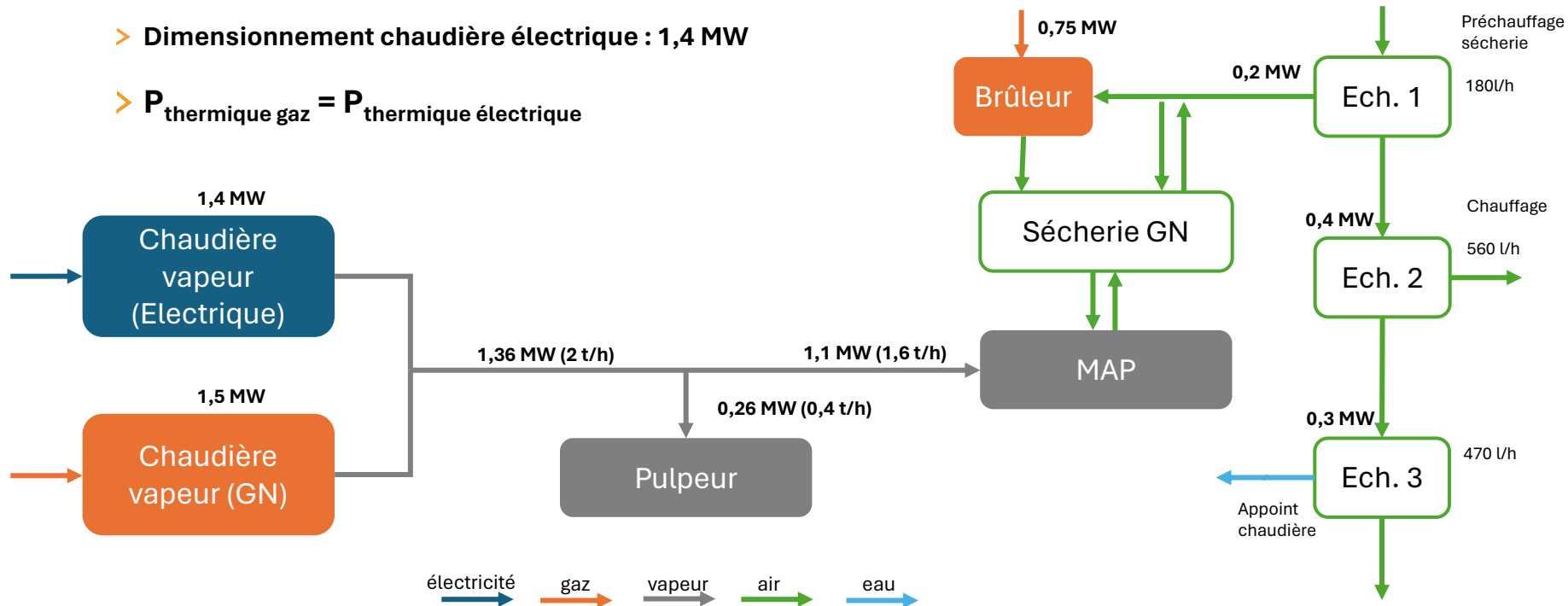


## Solution hybride pour la production de vapeur

- Le besoin vapeur ne change pas par rapport aux conditions actuelles

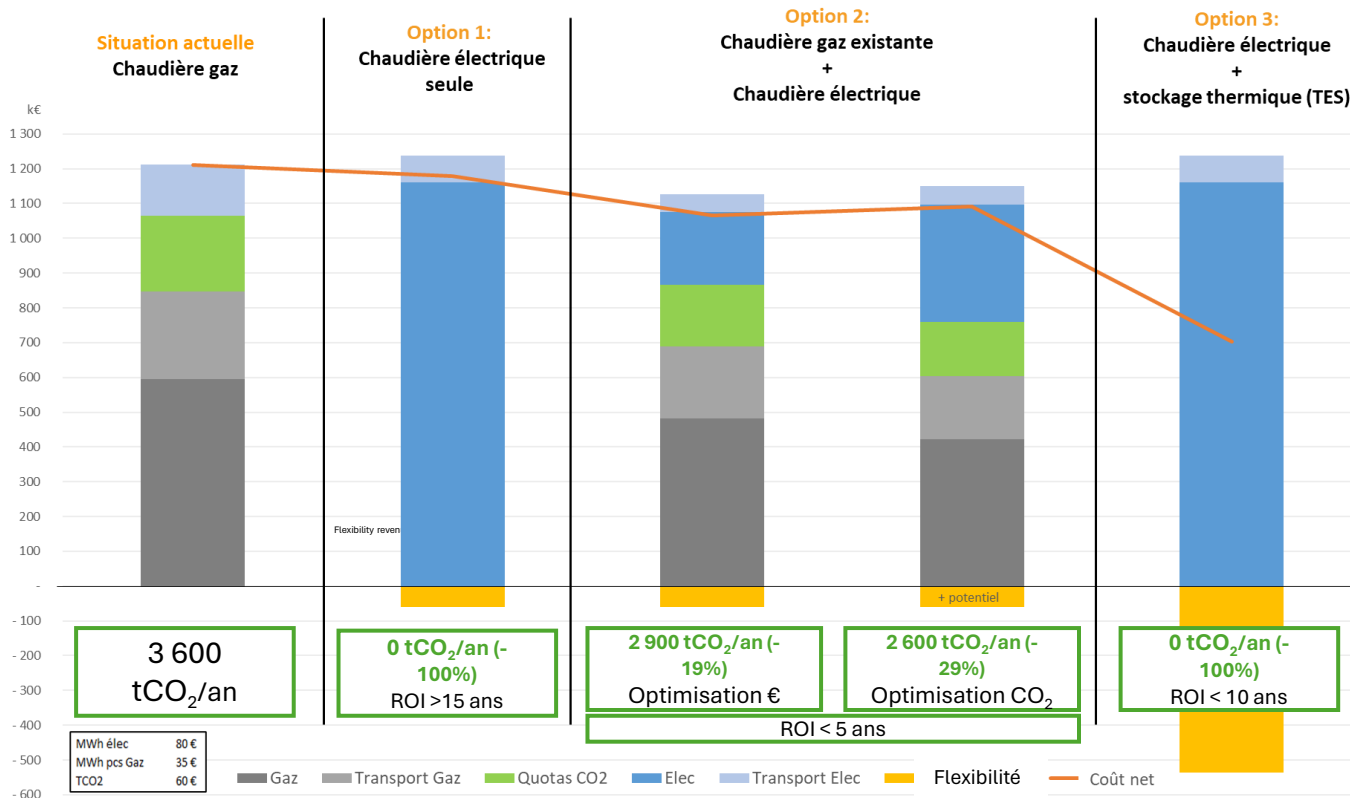
> Dimensionnement chaudière électrique : 1,4 MW

>  $P_{\text{thermique gaz}} = P_{\text{thermique électrique}}$



# Electrification/hybridation de la production de vapeur

## Arbitrage et flexibilité facteur de rentabilité économique



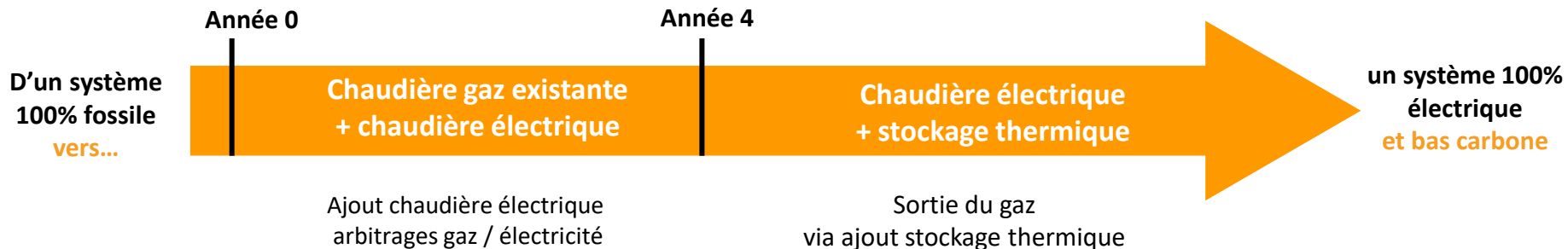
# Electrification/hybridation de la production de vapeur

## Robustesse industrielle pérennisée

|                                                                               | Retour sur investissement | Réduction des émissions SCOPE 1 | Exposition aux risques économiques |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Option 1: Electrification<br>Chaudière électrique seule                       | > 15 ans                  | -100 %                          | ELEVÉ                              |
| Option 2: Hybridation<br>Chaudière gaz existante<br>+<br>Chaudière électrique | < 5 ans                   | -20 à 30%                       | MAÎTRISÉ                           |
| Option 3: Stockage<br>Chaudière électrique<br>+<br>stockage thermique (TES)   | < 10 ans                  | -100 %                          | MAÎTRISÉ                           |

## Electrification/hybridation de la production de vapeur

### Solutions s'inscrivant dans une feuille de route complète





Smart energy management

**Bertrand MUNIER**

**Chef de projets décarbonation industrielle**

**06 07 21 73 61**

[bertrand.munier@energy-pool.eu](mailto:bertrand.munier@energy-pool.eu)

**Energy Pool**

Savoie Technolac – 20 rue Lac Majeur – Parc Ouragan – Bâtiment  
C

BP 90324

73 377 Le Bourget du Lac – France

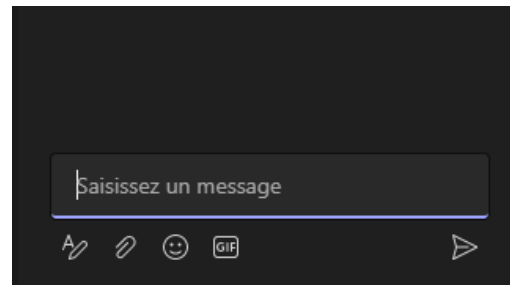
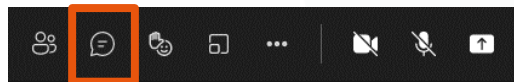
Tel. +33 (0)4 88 13 16 60 – Fax. +33 (0)4 79 85 12 74

[www.energy-pool.eu](http://www.energy-pool.eu)

@EPofficiel



# Posez vos questions !



# **PHASE 3 – ANALYSE ET CONCLUSION DE L'ETUDE**

# Analyse et conclusion de l'étude

## *Hybridation Electrique*

### - FREINS

- Limite de capacité électrique des installations (production, transports, transformateurs...)
- Moins adapté à des besoins ponctuels importants
- Chauffage convectif → pas électrifiable au-delà de 500°C
- OPEX élevé → variable suivant le prix des énergies par pays
- Poids carbone de l'électricité

### + LEVIERS

- Amélioration du rendement énergétique (Pas de pertes fumées)
- Adapté aux besoins continus (puissance de maintien en température)
- Offre une flexibilité et une adaptabilité aux marchés de l'énergie
- Décarbonation si mix électricité bas carbone
- Offre d'électricité bas carbone disponible

# Analyse et conclusion de l'étude

## Hybridation Hydrogène

### - FREINS

- Coût des électrolyseurs
- Coût encore trop bas des énergies conventionnelles
- Stockage H2 de grande capacité peu développé
- Des questionnements existent de la part des industriels quant à la durabilité des matériaux des fours exposés à des taux d'H2O élevés
- Garantie de la qualité produit → Peu impacté si le taux H2 est faible

### + LEVIERS

- Bien adaptée aux fours industriels THT nécessitant un effet convectif soutenu
  - > Four verrier
  - > Four terre-cuite
  - > Four métallurgique de fusion
- Chauffe rapide
- Recherche homogénéité de température
- Equipement thermique déjà existant et difficilement modifiable
- Fours à durée de vie longue (20 à 40 ans)
  - > Souhait de préservation de l'équipement
  - > Et les équipes (contraintes opérationnelles)
  - > Garantie de ne pas modifier la qualité produit

# Actualités ALLICE

# Animation de la communauté et valorisation de la filière

## Calendrier 2024

*Evènement  
coorganisé*

**6 juin**

Evaluation des impacts  
environnementaux des  
projets industriels par  
AXELERA, Tenerrdis et  
ALLICE (Lyon)

*Réunion des  
adhérents  
ALLICE*

**13 juin**

Club PRIME  
Réunion plénière

*Webinaire  
adhérents  
ALLICE*

**2 juillet**

Disponibilité future  
de la biomasse



**19 septembre**

FIRE 2024 (Lyon)

*Webinaire  
adhérents  
ALLICE*

**8 octobre**

Benchmark des aides  
pour la  
décarbonation de  
l'industrie dans les  
pays européens

*Evènement  
coorganisé*

**7 novembre**

Rencontre BtoB avec la  
filière du textile  
coorganisée avec  
Techtera et Unitex  
(Lyon)

*Webinaire  
adhérents  
ALLICE*

**14 novembre**

Freins et leviers pour  
le déploiement du  
stockage thermique

*Réunion des  
adhérents  
ALLICE*

**21 novembre**

Club PRIME  
Réunion plénière

