



Electrification de la chaleur, opportunités et cas concrets en industrie

12 janvier 2022



En partenariat avec



Sommaire

Introduction - Antoine Meffre (Eco-Tech Ceram) et Jean-Marc Piatek (ATEE)

1) CONTEXTE ET ENJEU – Ibrahim Al Asmi (Eco-Tech Ceram)

2) REX D'UN PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE – Thibaut Esence (Eco-Tech Ceram)

3) OPPORTUNITÉS À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE - Ibrahim Al Asmi (Eco-Tech Ceram)

L'ASSOCIATION TECHNIQUE ENERGIE ENVIRONNEMENT

C'est une **association professionnelle française** créée en 1978 dont le but est la **promotion de l'efficacité énergétique** dans les entreprises et les collectivités, l'information sur les enjeux environnementaux liés à l'énergie et le soutien **aux énergies renouvelables**.

Elle compte **2 500 adhérents**, dont elle rassemble les **personnes physiques** ou **morales** concernées par la **maîtrise de l'énergie** y compris son **impact sur le climat**.

Avec ses **6 clubs thématiques** (C2E, Biogaz, Power to Gas, Stockage d'Énergies, Cogénération, Pyrogazéification) et ses **11 délégations régionales**, l'ATEE constitue un **carrefour d'échanges** et de réflexion pour ses adhérents permettant de confronter les points de vue et de capitaliser les **retours d'expérience**.

Chaque année, c'est **plus de 40 événements** organisés autour de la maîtrise de l'énergie : colloques, conférences, visites.

Le département Maîtrise de l'Énergie anime la **Communauté des Référents de l'énergie**. Il porte **2 programmes nationaux** : **PRO-SME**n dont l'objet est de promouvoir la certification ISO 50001 et **PROREFEI** qui forme les salariés en charge de la gestion de l'énergie pour les accompagner dans leur démarche d'efficacité énergétique.

L'ATEE publie **ENERGIE PLUS**, la **revue bimensuelle** de la maîtrise de l'énergie.



Agir ensemble pour une énergie durable, maîtrisée et respectueuse de l'environnement.



Décarbonation de l'industrie, de quoi parle-t-on ?

La décarbonation des activités industrielles consiste à réduire ou supprimer les émissions de CO2 et/ou tout autre gaz à effet de serre émanant des activités ou des productions des sites industriels.

Les principaux leviers pour décarboner sont :

- **La réduction de la consommation d'énergie** (efficacité énergétique);
- **L'usage d'énergie décarbonée** (énergies renouvelables, récupération de chaleur fatale, hydrogène...) - **L'électrification des procédés** et la flexibilité/**effacement électrique**;
- **La réduction des émissions des GES non-énergétiques** (intrants matières alternatifs, recyclage matière...);
- Le déploiement des **puits de carbone naturels ou artificiels** (reforestation, captage/stockage/utilisation de carbone...).

Quelques exemples de leviers permettant la décarbonation



Zoom AAP IndusEE

Une diversité des projets révélatrice de la diversité des procédés industriels

Efficacité énergétique



Séchage
énergétiquement
plus performant via
l'amélioration de la
formation des
feuilles papier

Papier

Intrants matières alternatifs



Substitution de
clinker par des
argiles activées
pour produire du
ciment
bas-carbone

Ciment

Récupération de chaleur



Récupération de
chaleur fatale des
fumées du four
verrier pour
production
d'électricité via
ORC

Verre

Electrification



Remplacement
d'un
turbocompresseur
au charbon par un
moto-
compresseur
électrique

Chimie



Installation d'un
séchoir
énergétiquement
plus performant
(capacité d'accueil
de CSR)

Plâtre

ArcelorMittal

Co-Injection de Gaz
de Cokerie dans un
haut fourneau pour
réduire la
consommation de
coke enfourné

Acier



Récupération de
la chaleur des
fumées des
incinérateurs pour
produire du froid

Imprimerie



Installation d'une
Recompression
Mécanique de
Vapeur (RMV)
électrique pour
production de sel
solide

Chimie

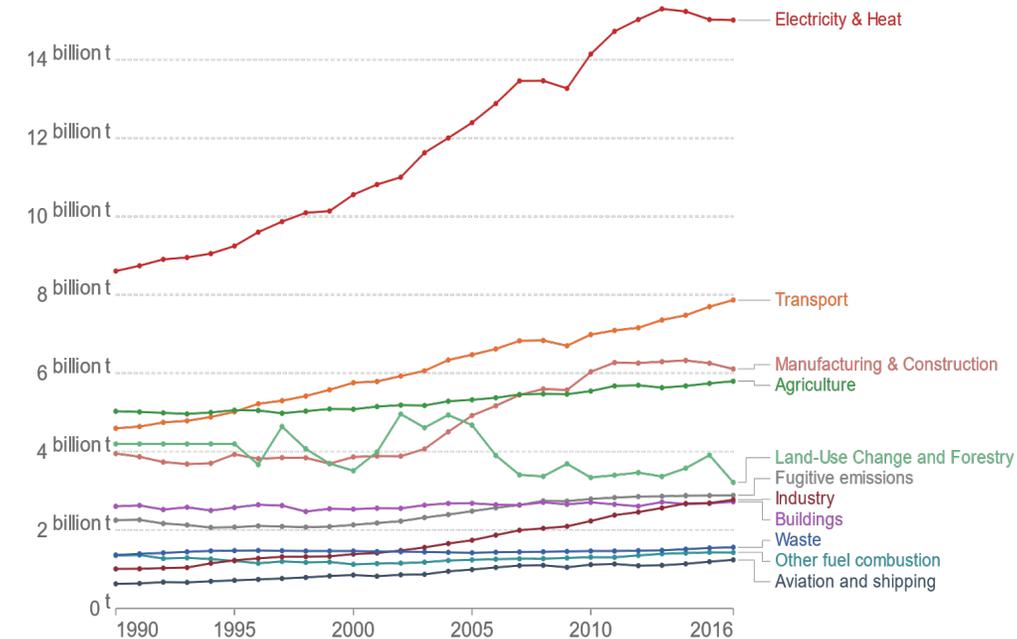
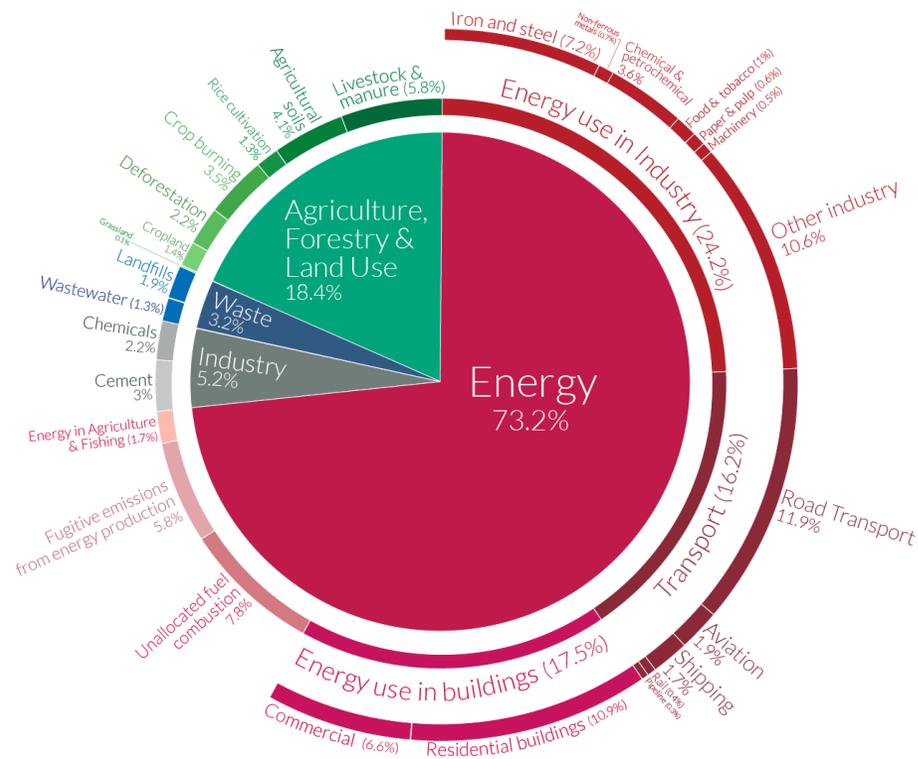


I. CONTEXTE ET ENJEUX

ECO-TECH CERAM

CONTEXTE ET ENJEUX

Gas à effet de serre



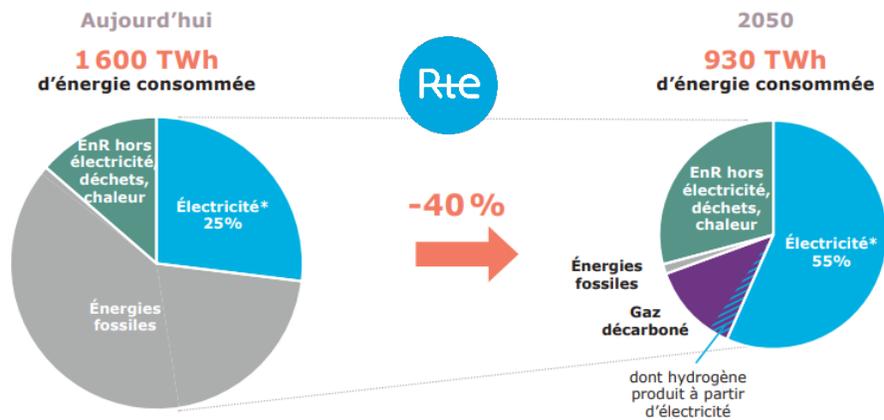
Source: CAIT Climate Data Explorer via. Climate Watch

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

73 % des GES proviennent du secteur de l'énergie
Plus de 55 % de ces GES sont dans l'industrie et le résidentiel
Ce sont majoritairement des besoins en chaleur et électricité

CONTEXTE ET ENJEUX

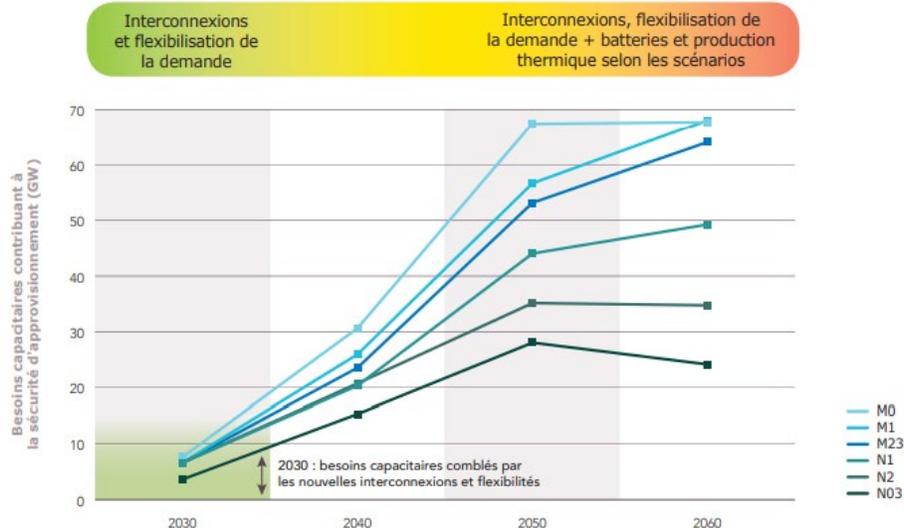
Gas à effet de serre



Réduire la conso de 40 % tout en électrifiant les usages énergétiques



couplage de secteur



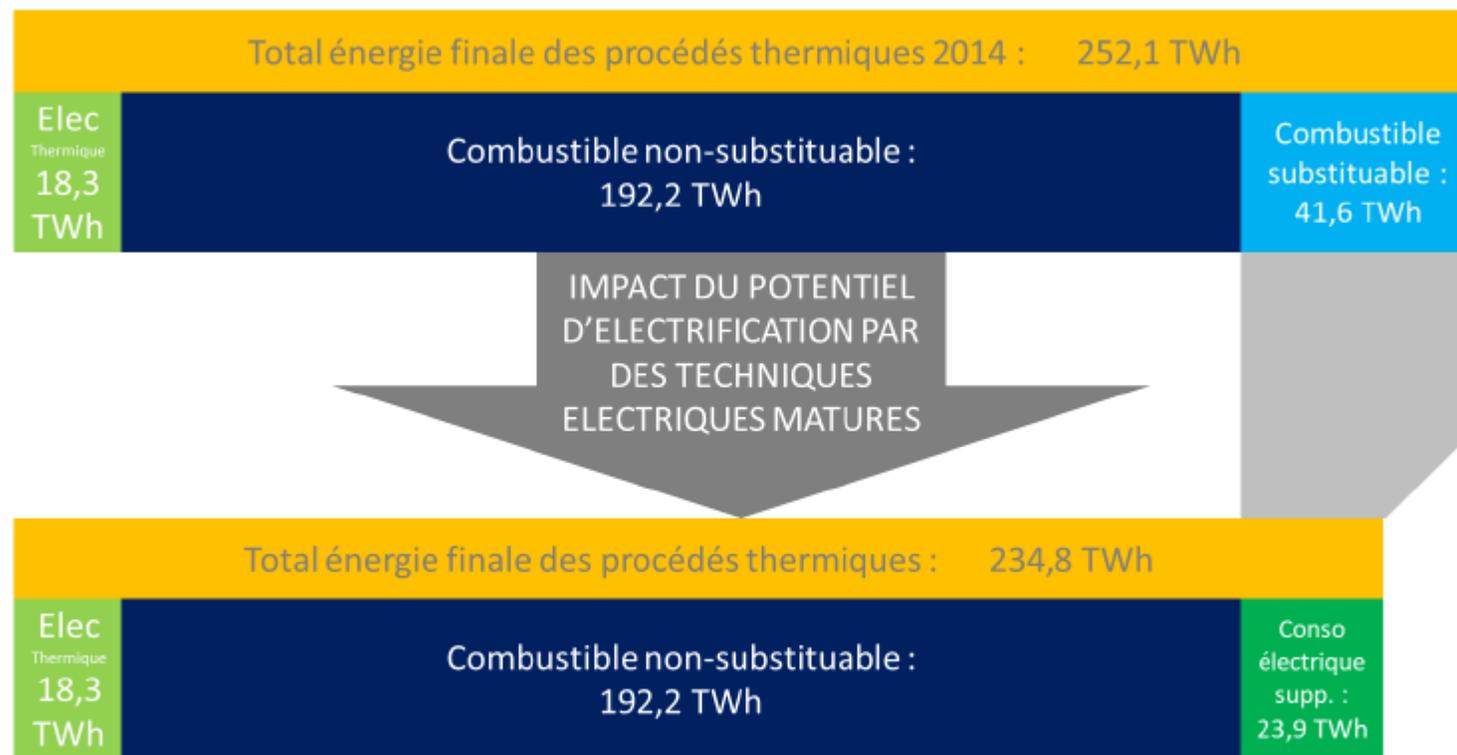
Remédier à l'intermittence des énergies renouvelables



stockage d'énergie et flexibilisation de la demande

CONTEXTE ET ENJEUX

électrification de la chaleur industrielle

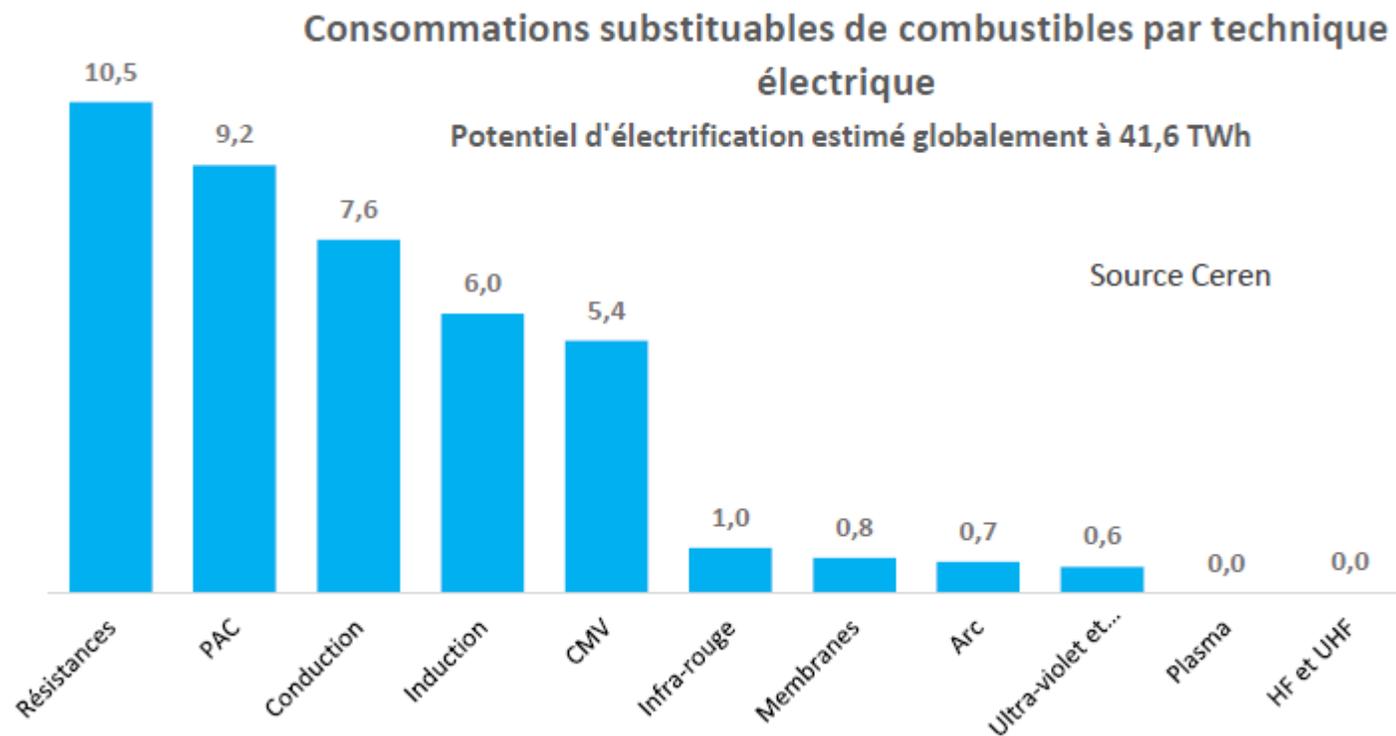


Données Ceren

➤ 41,6 TWh de conso fossile potentiellement substituable avec 43 % d'économies d'énergie

CONTEXTE ET ENJEUX

électrification de la chaleur industrielle – comment ?



➤ Des techniques d'électrification matures et connues par le marché

CONTEXTE ET ENJEUX

électrification de la chaleur industrielle – comment ?



Fours intermittents CH4



Four à arc



PAC



Four à induction



Résistance électrique





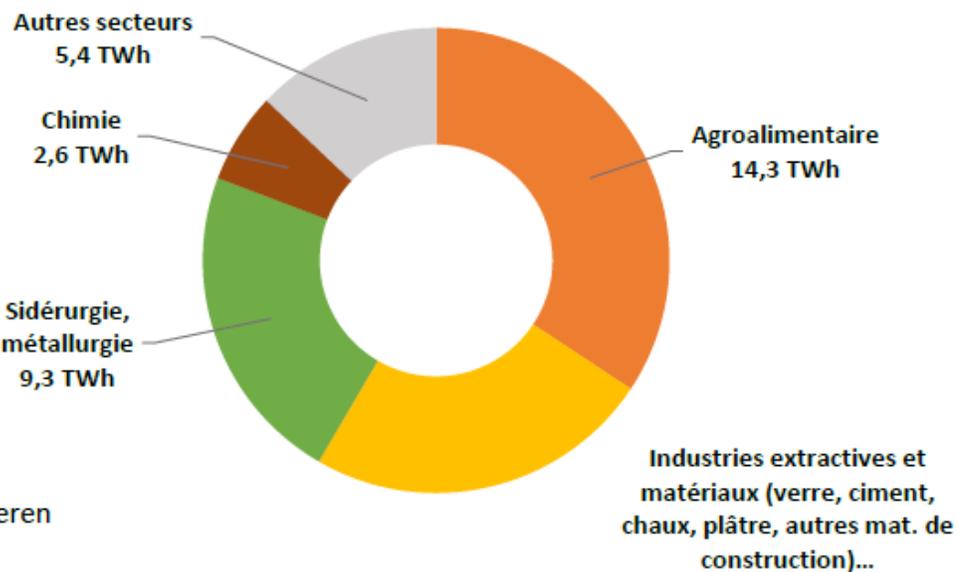
CONTEXTE ET ENJEUX

électrification de la chaleur industrielle – où ?



Combustibles substituables par secteur

Potentiel d'électrification global : 41,6 TWh



Source Ceren

- Les secteur agroalimentaire, d'extraction de matériaux, et la sidérurgie constituent à électrifier en premier pour un gain potentiel

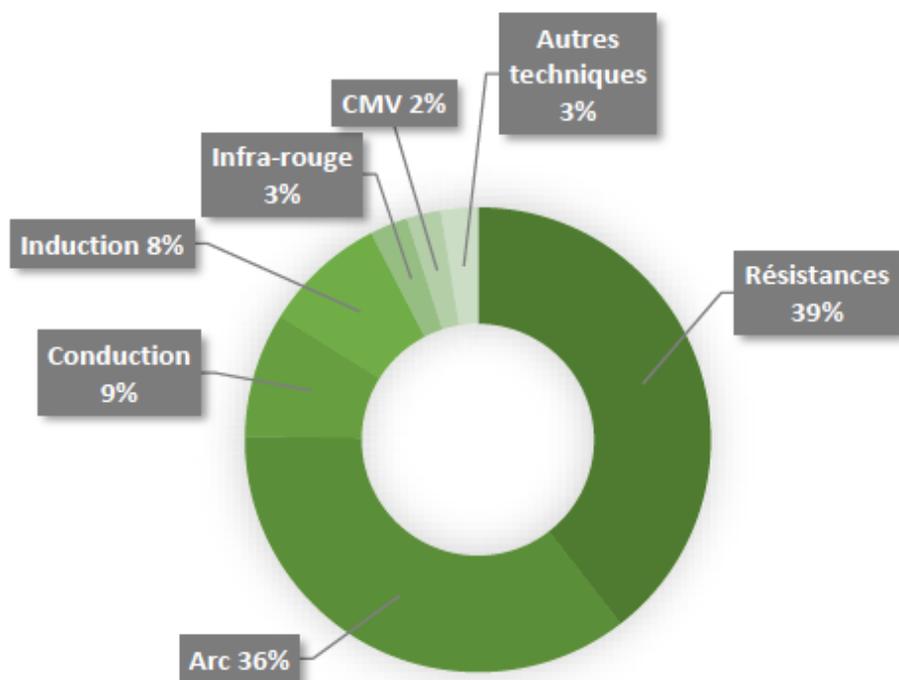
CONTEXTE ET ENJEUX

Électrification de la chaleur industrielle – une opportunité pour le stockage thermique



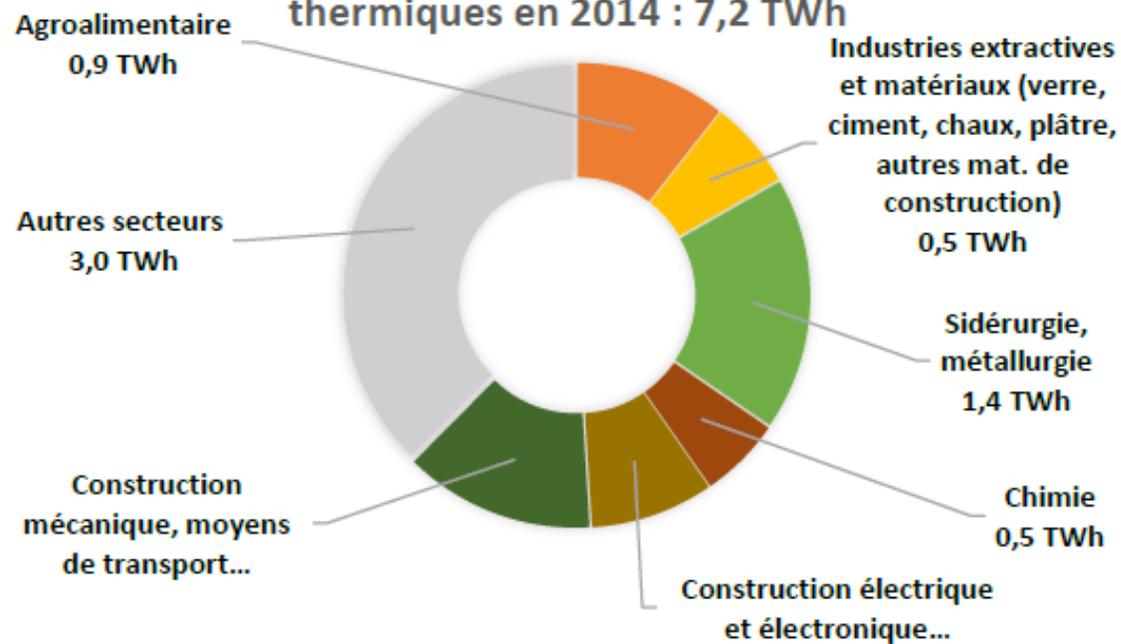
Consommation actuelle électrique dans les procédés thermiques

en 2014 : 18,3 TWh



Source Ceren

Usages des résistances dans les procédés industriels
 thermiques en 2014 : 7,2 TWh



➤ Une opportunité économique pour le stockage thermique dans les fours à résistances

CONTEXTE ET ENJEUX

électrification de la chaleur industrielle – pourquoi un stockage thermique



INTRADAY 3 MONTHS 1 YEAR **2 YEARS** LAST UPDATE TIME: 01-07-2022 5:00 PM GMT



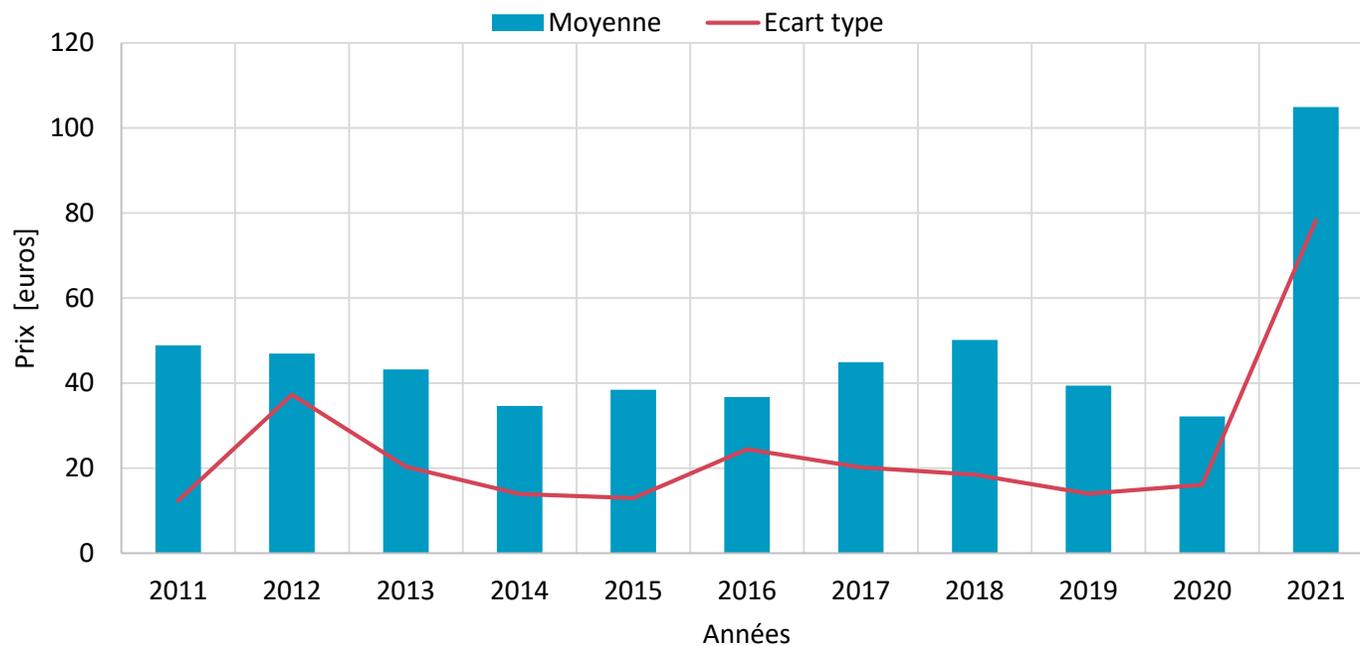
EUA (EU ETS) Futures Prices

Daily Carbon Prices

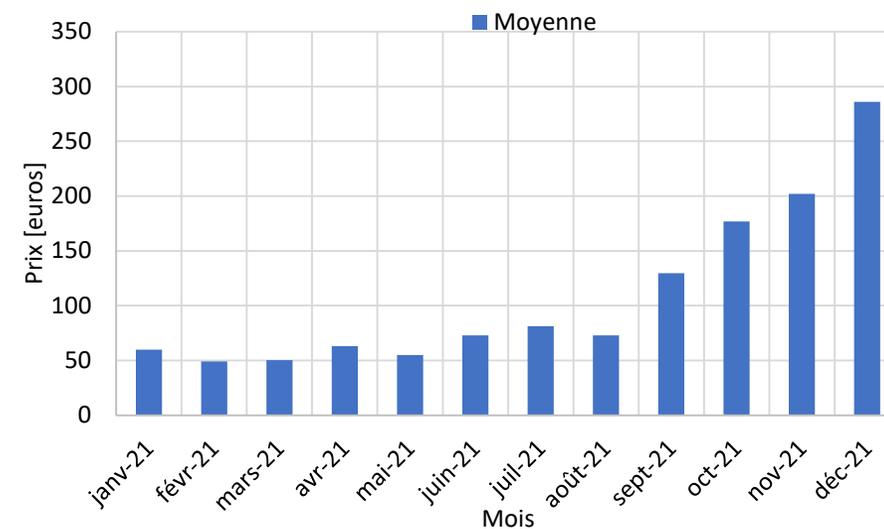


CONTEXTE ET ENJEUX

électrification de la chaleur industrielle – pourquoi un stockage thermique



epexspot



Niveau et volatilité du prix de l'élec plus importants => possibilité d'accéder à de l'électricité à bas cout grâce au stockage d'énergie



II. REX D'UN PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

ECO-TECH CERAM

REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

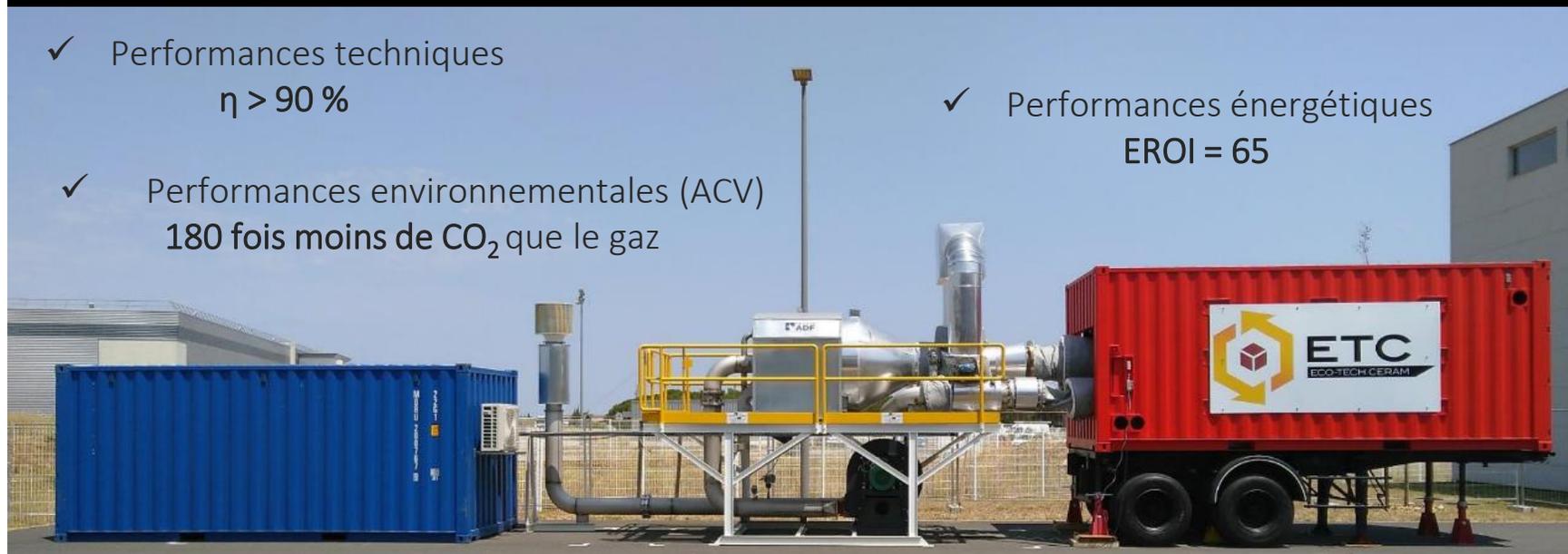
BANC DE TEST DE STOCKAGE THERMIQUE



✓ Performances techniques
 $\eta > 90 \%$

✓ Performances environnementales (ACV)
180 fois moins de CO₂ que le gaz

✓ Performances énergétiques
EROI = 65



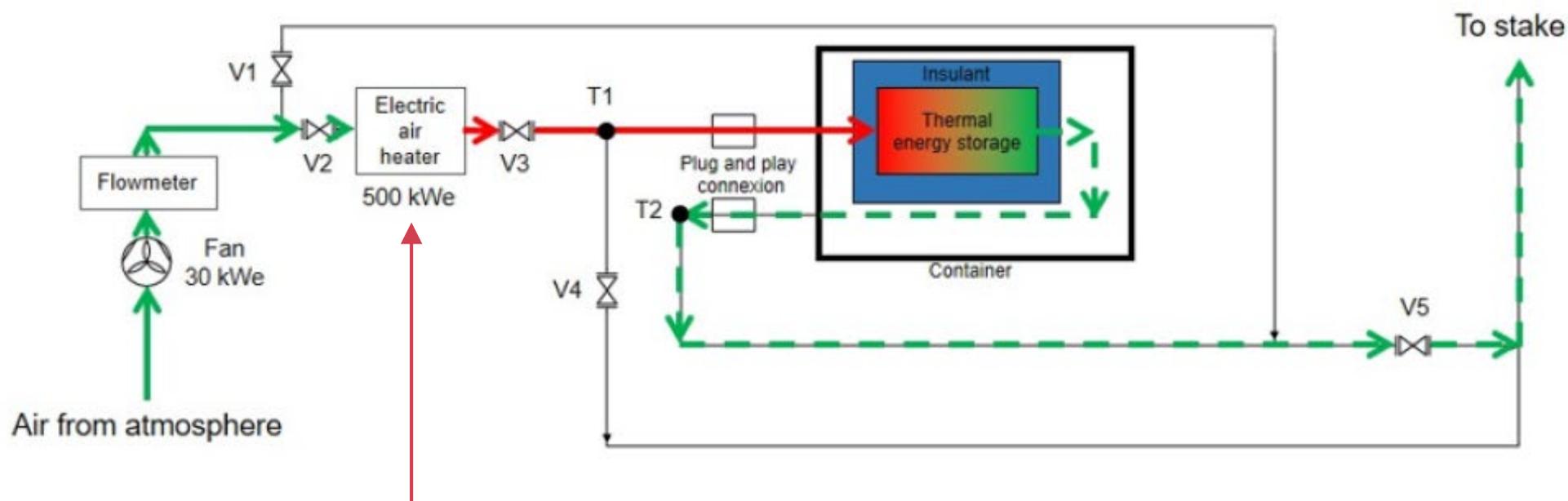
- Validation du stockage de la chaleur produite à partir d'électricité
- Pilote industriel : TRL 7

REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

stockage de chaleur d'origine électrique



Schéma de fonctionnement en charge



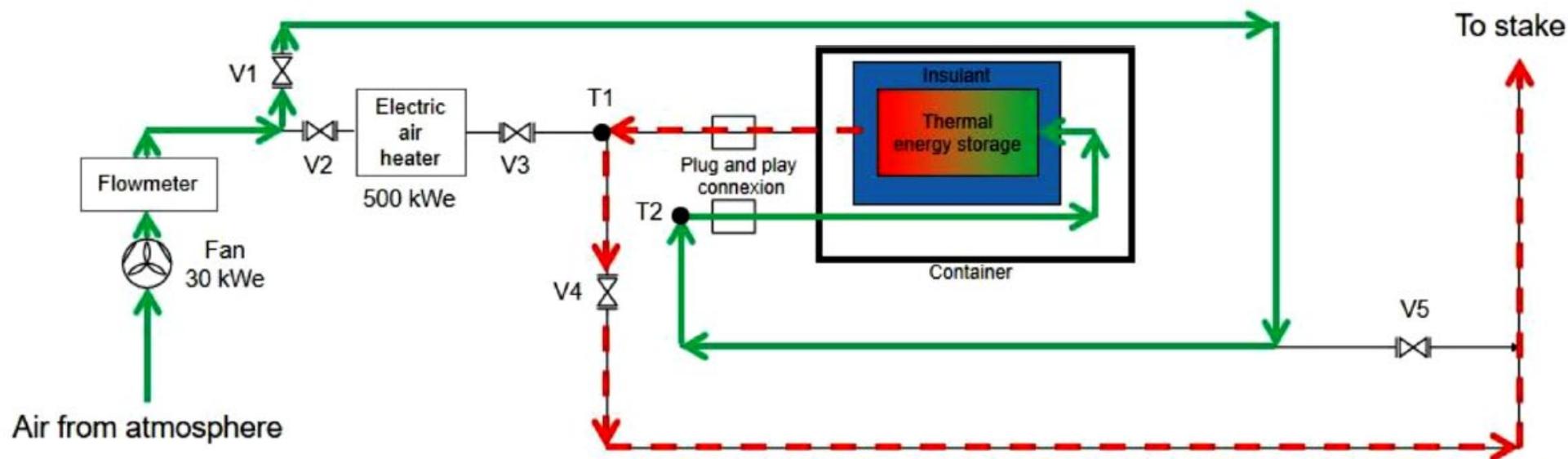
- Système *Power To Heat* de type résistif
- Puissance installée : 500 kW_e
- Température maximale : 1 000 °C

REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

stockage de chaleur d'origine électrique



Schéma de fonctionnement en décharge

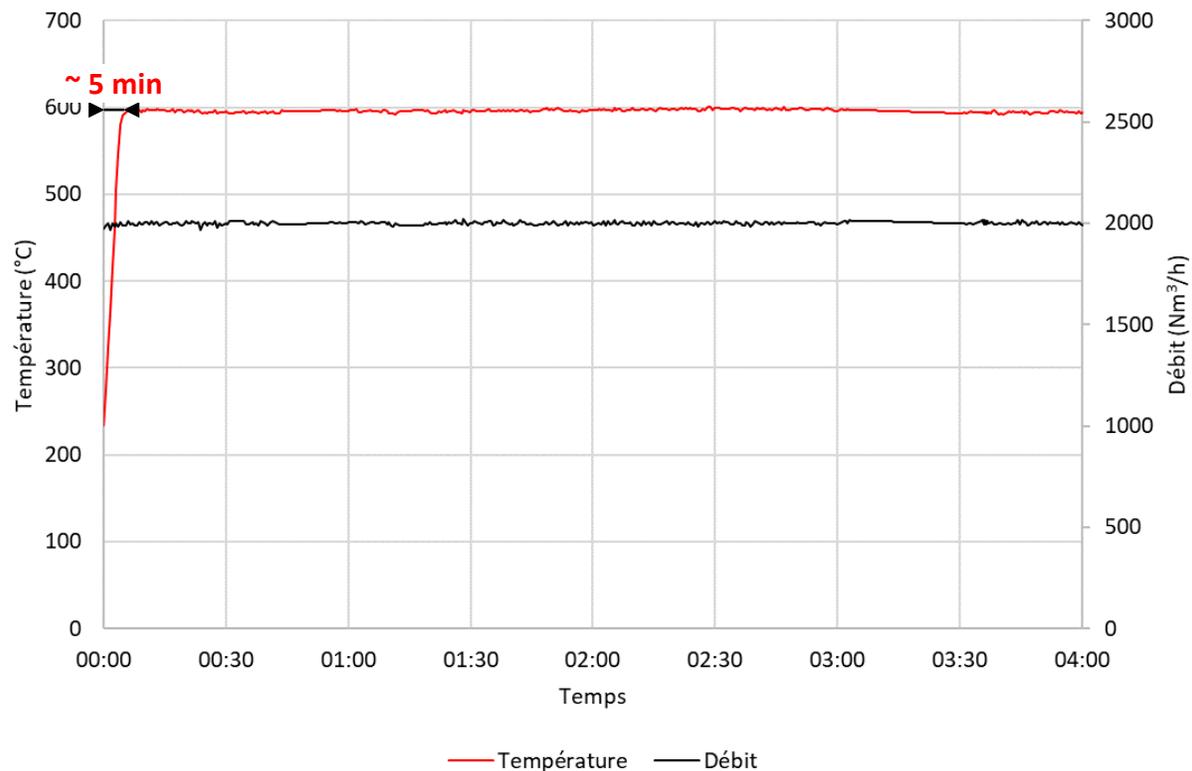


REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

PILOTAGE ET RÉGULATION DE LA SOURCE DE CHALEUR



Température et débit d'air du système de production de chaleur d'origine électrique



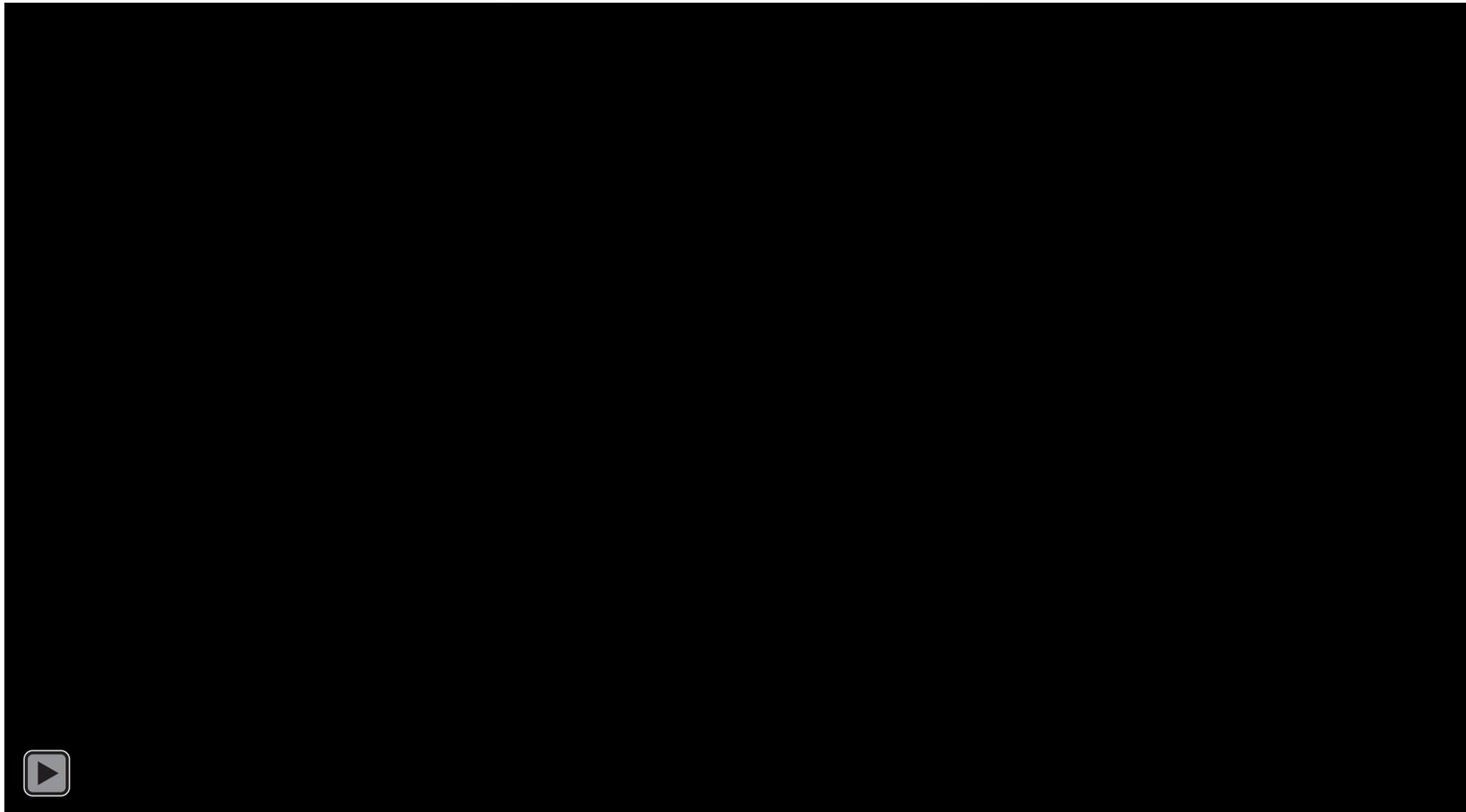
- Forte réactivité : 5-10 min
- Température (et puissance) stable : $\sigma < 2 \text{ }^\circ\text{C}$

REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

SYSTÈME DE STOCKAGE DE CHALEUR



Températures mesurées dans le pilote



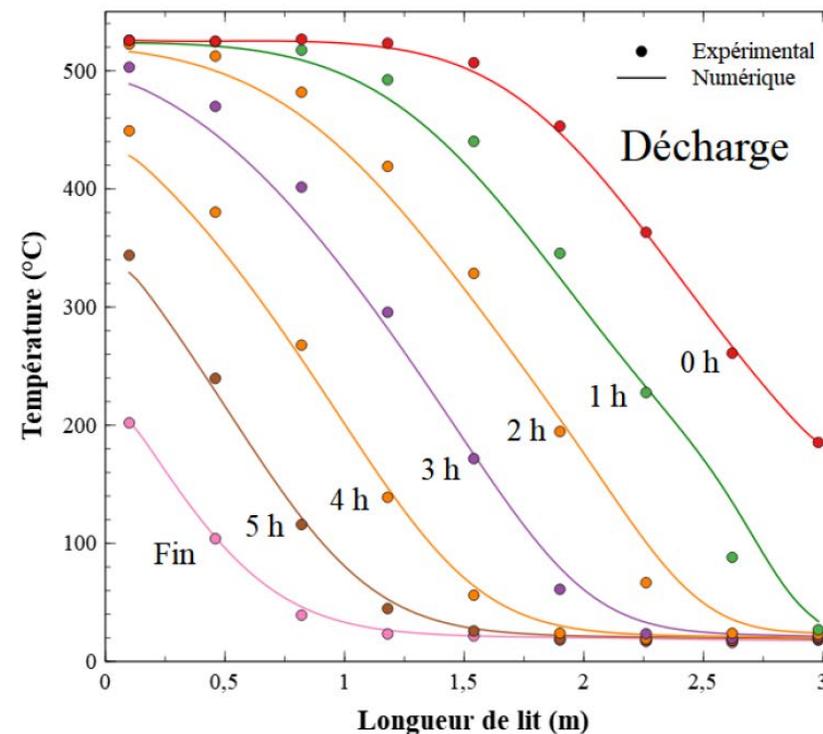
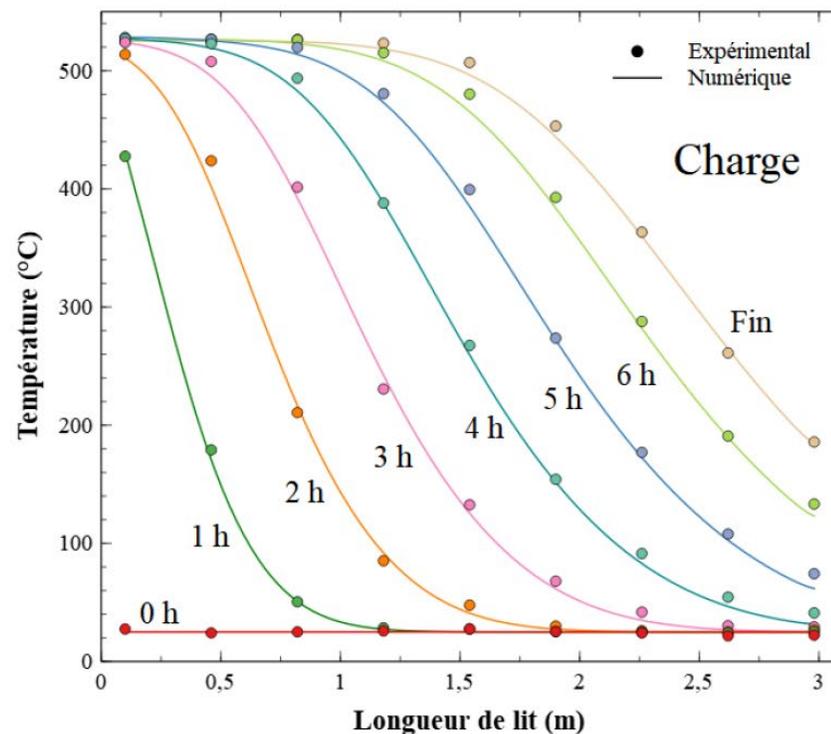
➤ Système de type thermocline : « batterie de chaleur »

REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

VALIDATION DU CONCEPT ET DES MODÈLES NUMÉRIQUES



Profils de températures dans le système de stockage thermique (expérience vs modèle)



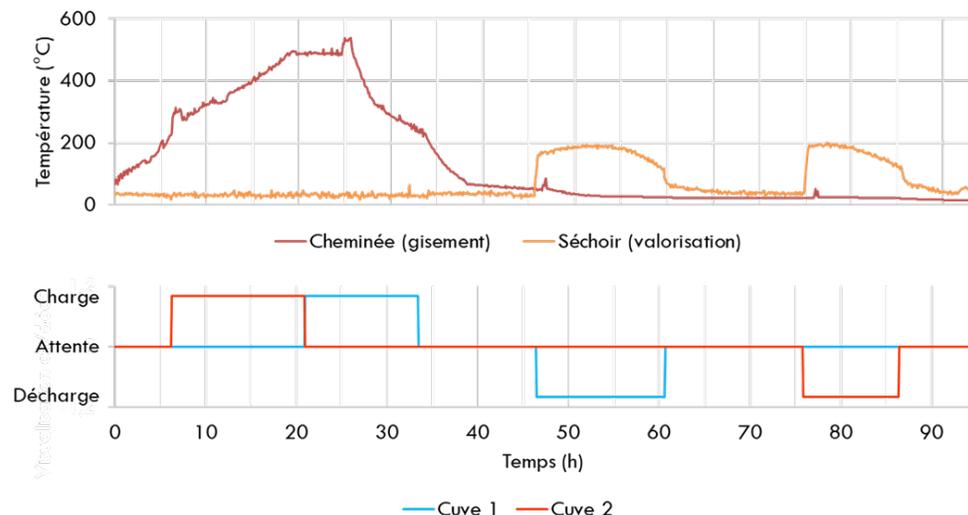
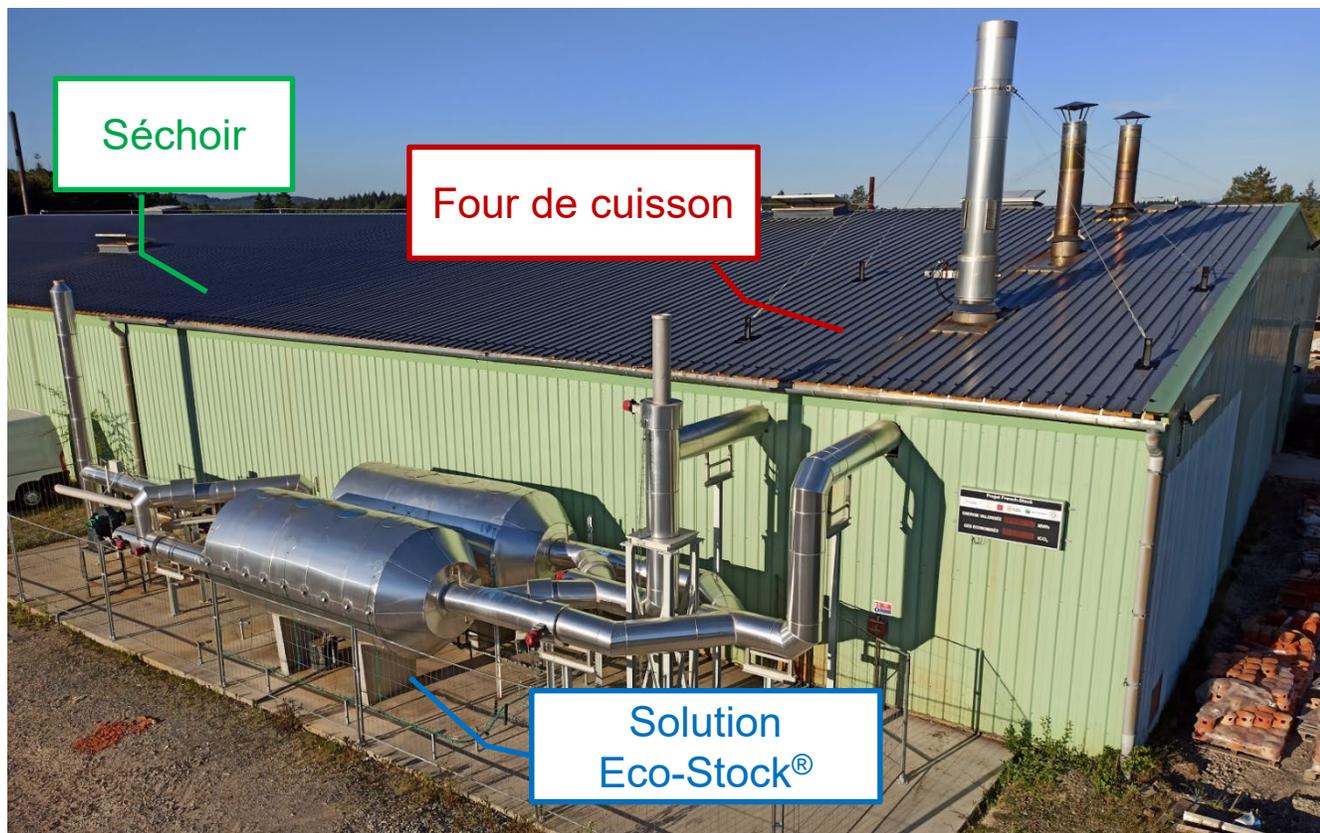
- Stockage de chaleur éprouvé et validé
- Validation des modèles numériques de stockage de chaleur

REX d'un PILOTE INDUSTRIEL HAUTE TEMPÉRATURE

RÉALISATION INDUSTRIELLE : TÉGULYS



Valorisation de la chaleur fatale d'un four de cuisson de tuiles vers un séchoir



Indicateur	Valeur
Température max	500 °C
Capacité de stockage	2 MWh
Puissance max	750 kW
Efficacité stockage	93 %
Résultat net annuel	20 k€/an
Temps de Retour Brut	5 ans
Réduction CO ₂	100 t/an

- Consommation spécifique d'énergie : **-12 %**
- Gain de productivité : **+5 %**

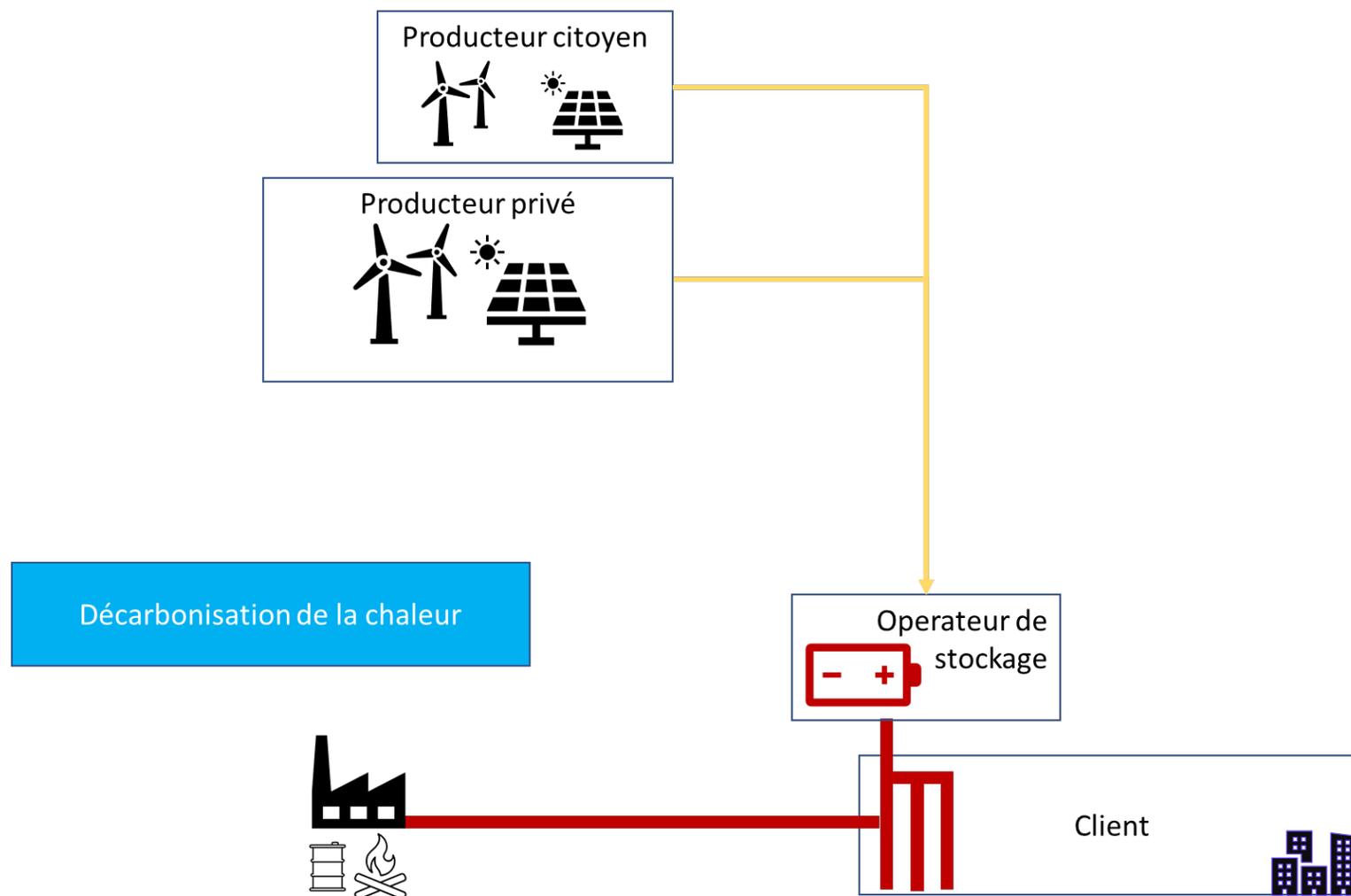


III. OPPORTUNITÉS À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE

ECO-TECH CERAM

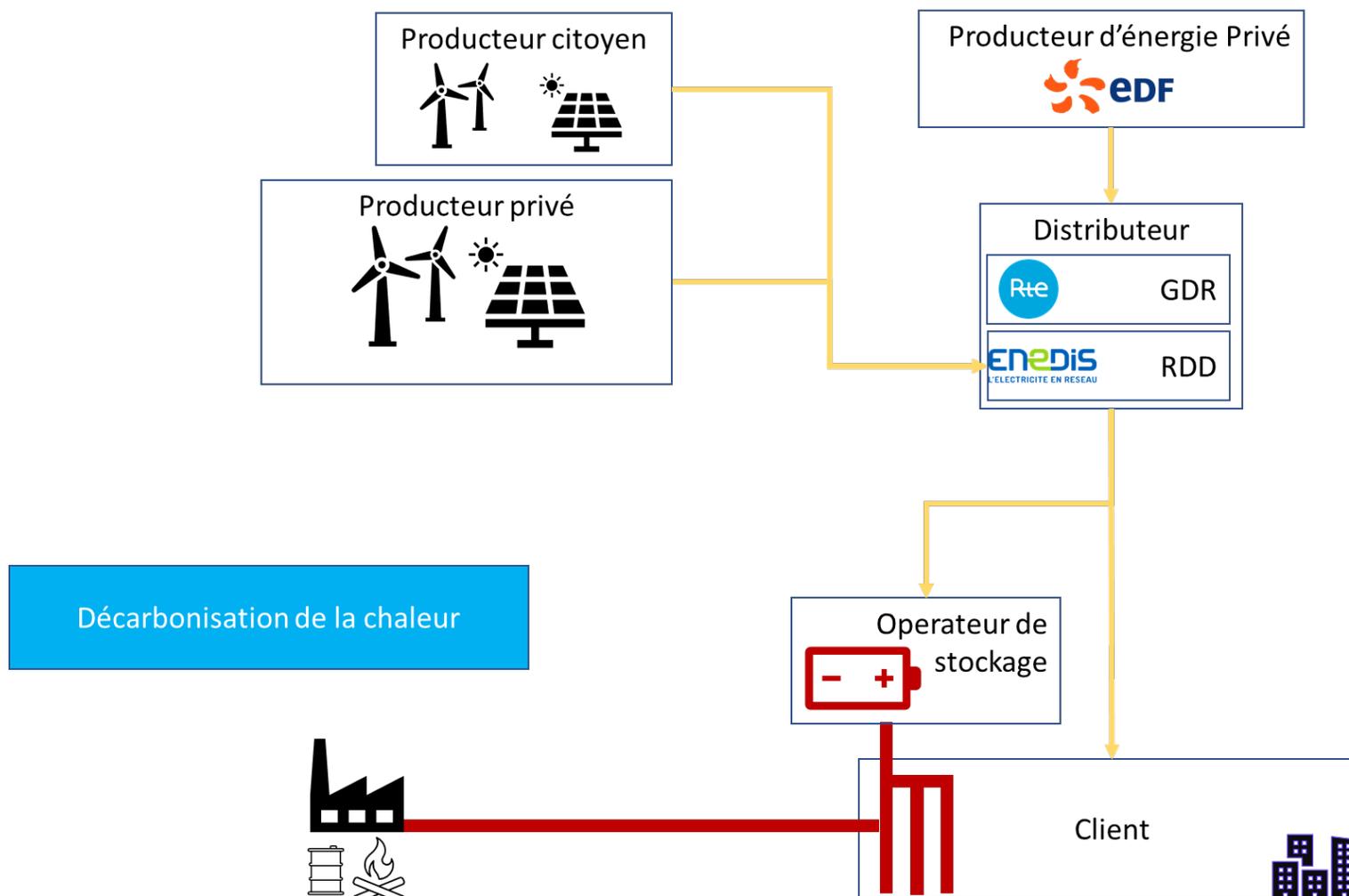
Les opportunités à l'échelle industrielle

SCHÉMA DISTRIBUTUÉ



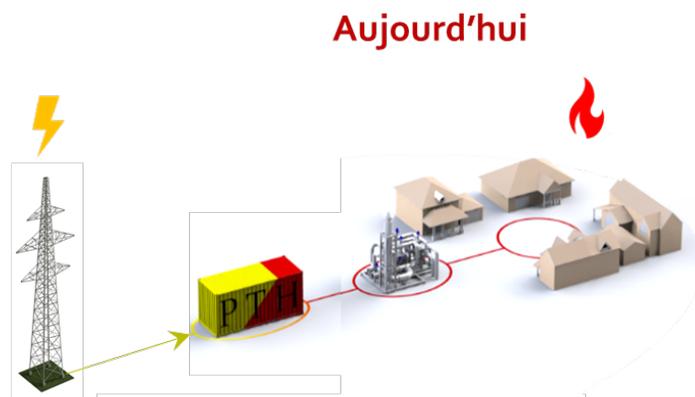
Les opportunités à l'échelle industrielle

SCHÉMA CENTRALISÉ



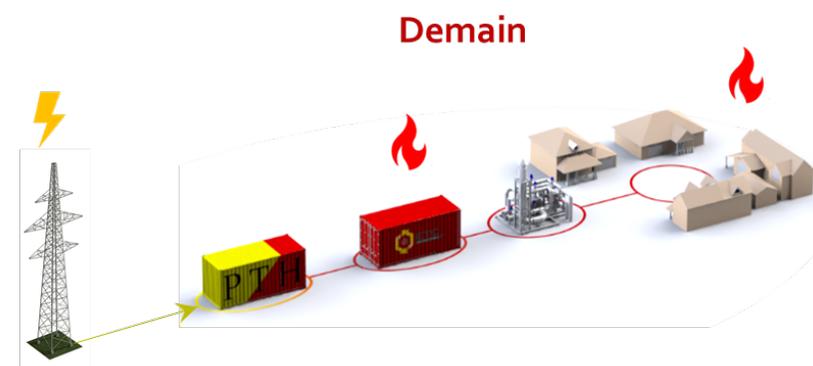
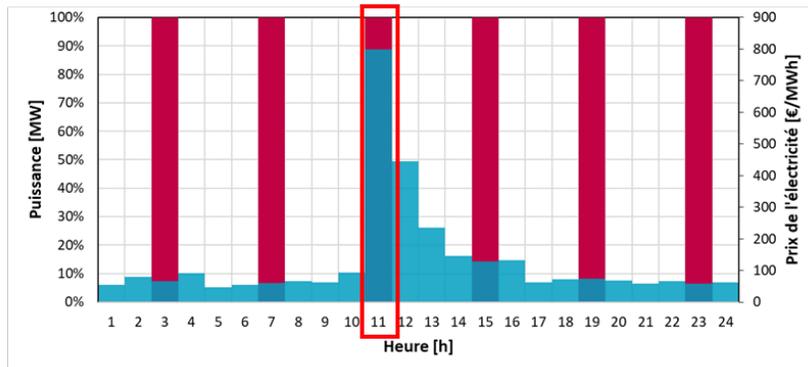
Les opportunités à l'échelle industrielle

objectif



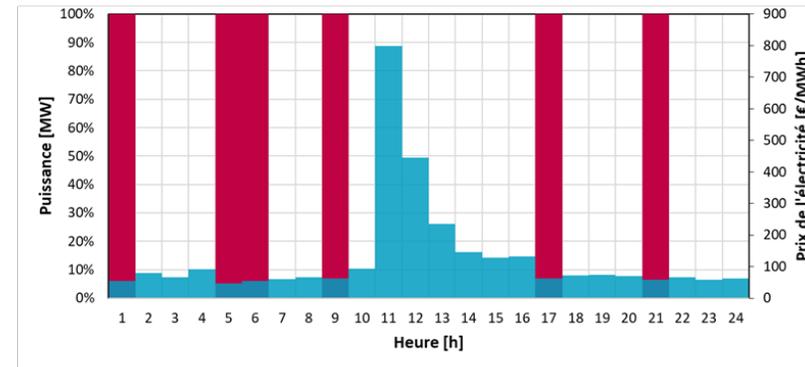
Achat d'Énergie (05/12/2019)

■ Énergie achetée ■ Prix de l'énergie



Achat d'Énergie (05/12/2019) avec

■ Énergie achetée ■ Prix de l'énergie

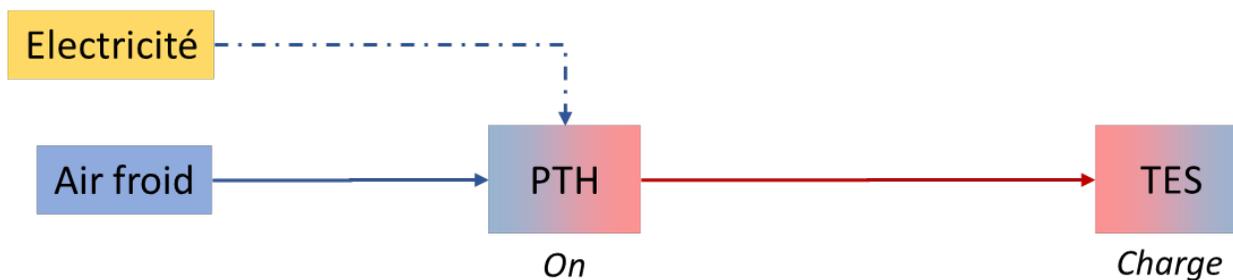
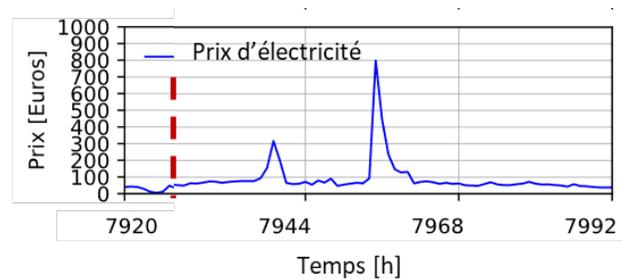


**25 à 50 %
d'économies**

➤ Le stockage thermique permet d'acheter l'électricité pendant les périodes creuses

Les opportunités à l'échelle industrielle

Solution : charge



Légende:

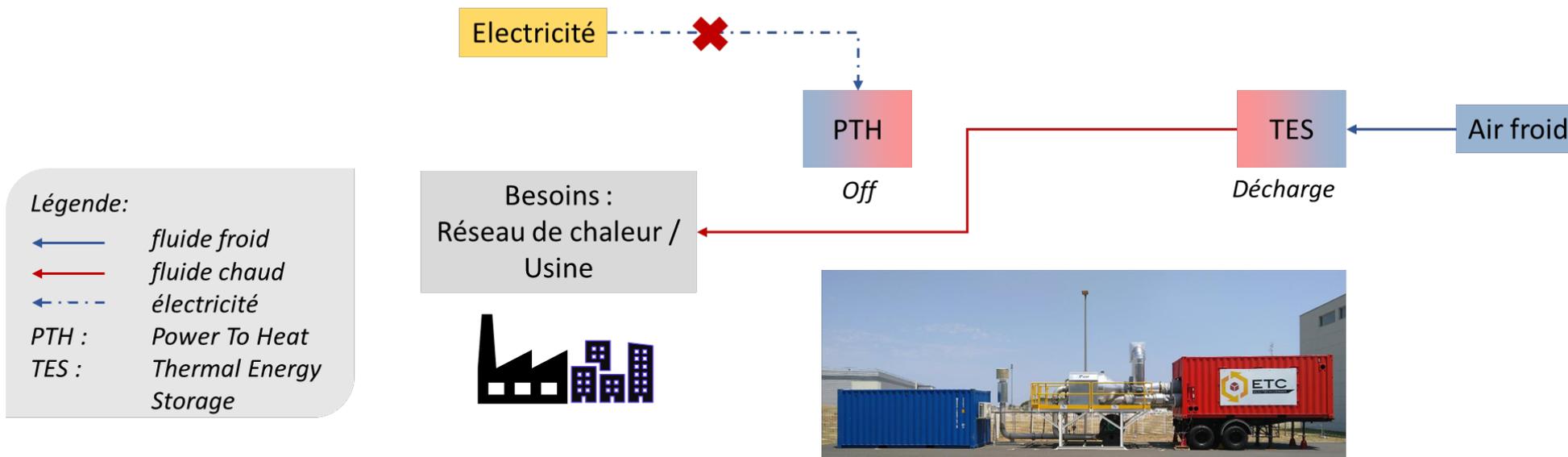
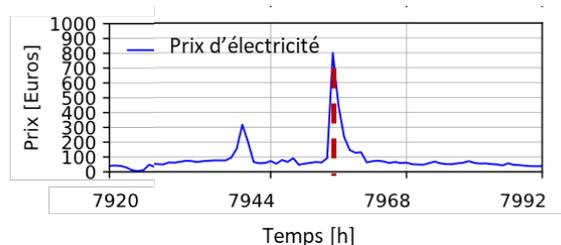
- fluide froid
- fluide chaud
- électricité
- PTH : Power To Heat
- TES : Thermal Energy Storage



➤ Achat et stockage d'électricité à prix faible

Les opportunités à l'échelle industrielle

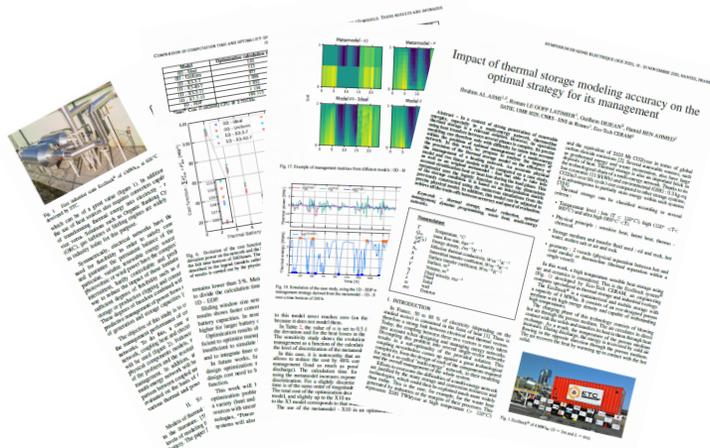
Solution : décharge



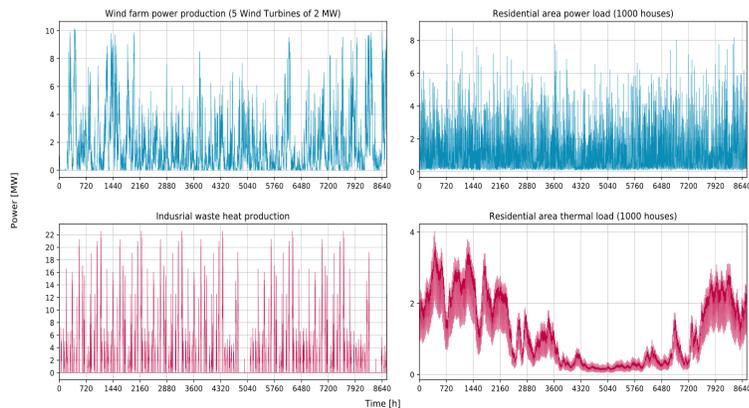
➤ Effacement de la consommation d'électricité pendant les heures pleines ➔ économies

L'IA pour un optimal technico économique

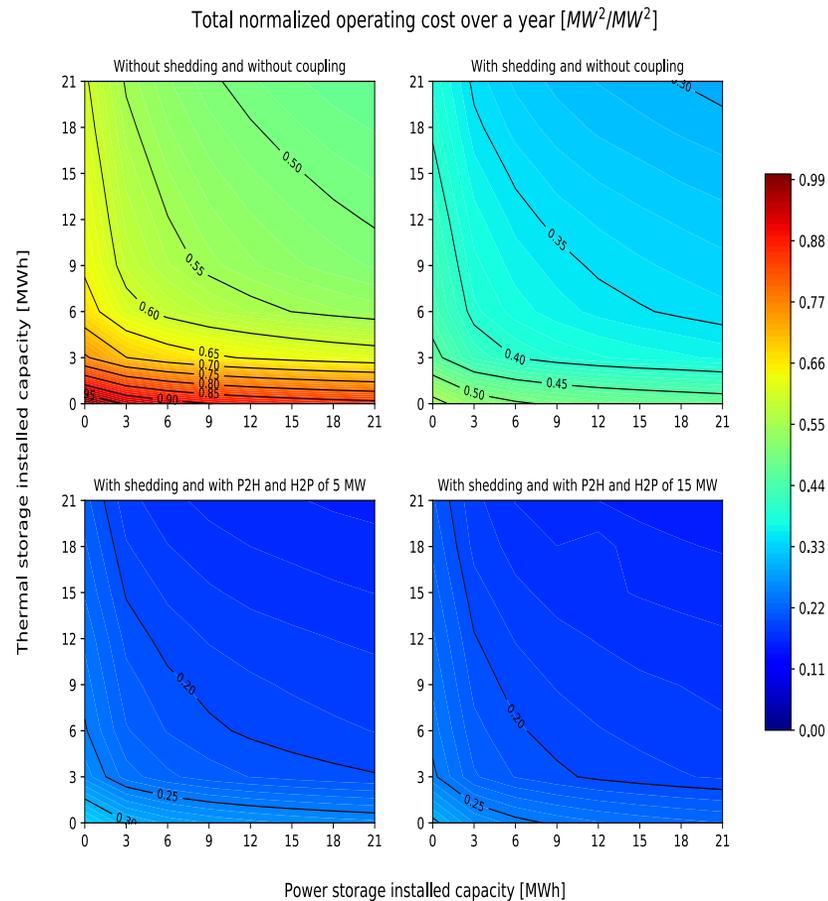
Thèse en 2019 avec l'ENS



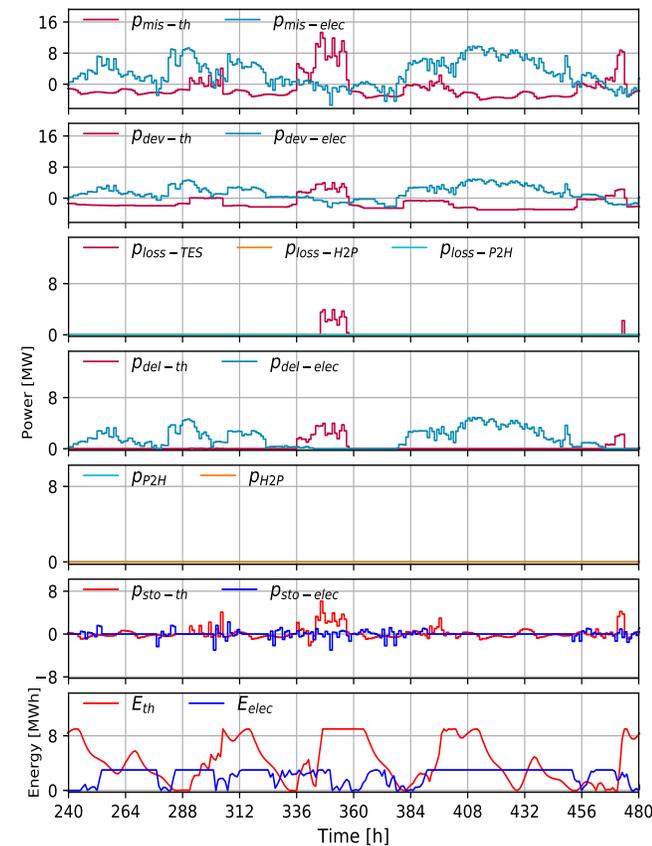
Data et prédiction



Dimensionnement optimale

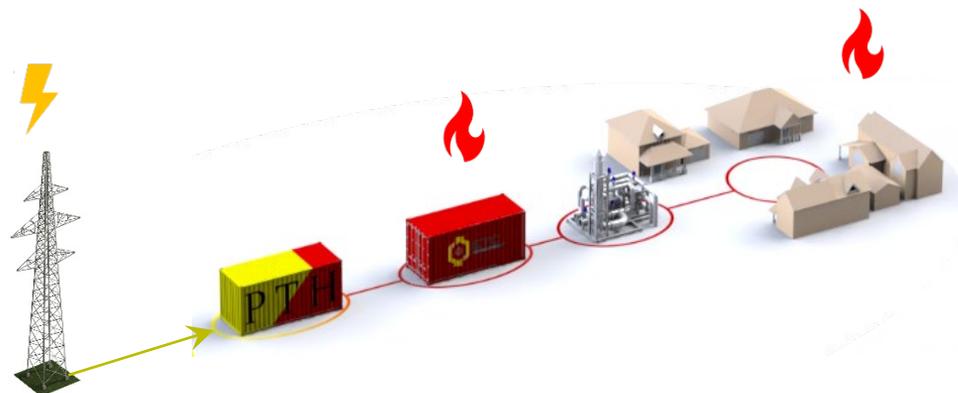


Pilotage optimale



Les opportunités à l'échelle industrielle

Un cas d'étude industriel



28 % d'économie sur la Facture d'électricité
duplicable sur 25 sites en France

	Energie totale achetée [MWh/an]	Facture d'énergie initiale (k€)	Facture avec ETC (k€)	Prix moyen de MWh	Stockage installé (MWh)	CAPEX (k€)	Gain annuel net (k€)	TRB (ans) Sans subvention	TRB (ans) Avec subvention
Avec IA	4 380	175	125	28,5	4	300	50	7 à 10	4 à 6
Sans IA	4 380	175	160	36,5	5	375	15	12 à 15	7 à 8
Sans IA sans ETC	4 380	175	-	40	-	-	-	-	-

*Calcul réalisé avec les pris communiqué par l'industriel sur l'année 2019

Les opportunités à l'échelle industrielle

Bénéfices clients



Technologies

Scalable avec des unités de 2 MWh, puissance = 0.1 à 2 MW / unité, chaleur jusqu'à 1000°C et durée de vie de 15 à 20 ans

Economique

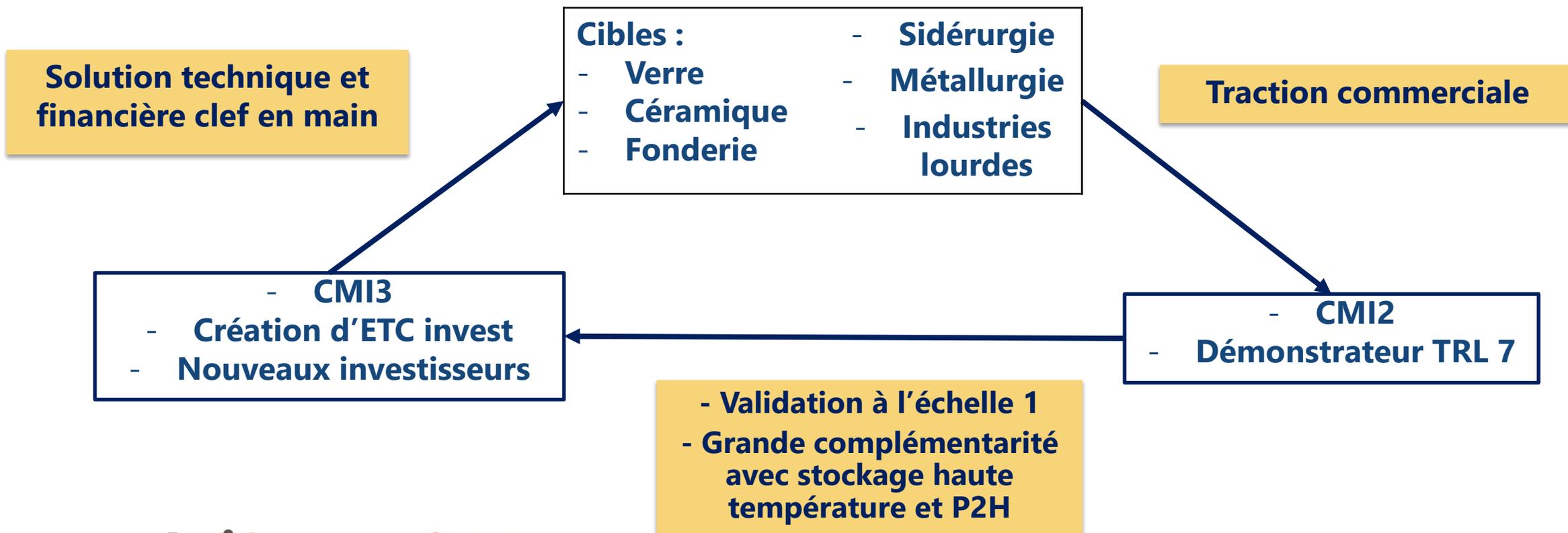
Permet de réduire la consommation d'énergie fossile en se substituant à la combustion de gaz à faible coût
75 Coût Economique [€/kWh_{installé}]

Ecologique

Accompagne la stratégie de décarbonation de la chaleur Coût Environnemental 2 [kgCO₂/MWh_{fourni}]

➤ Une solution durable, facilement installable, rentable et finançable

Les dynamiques qui orientent l'activité d'Eco-Tech Ceram



Questions - Débat - Echange

