

Quelques informations pratiques

- Merci de couper vos micros et caméras
- Une session de questions-réponses est prévue après chaque intervention. Pour participer :
 - Utilisez le chat écrit
 - Précisez dans le chat si vous souhaitez intervenir à l'oral
- Les présentations seront disponibles sur l'extranet ALLICE sous quelques jours.
- Contactez le 06 27 38 26 76 (Clémence) en cas de souci technique



Bon visionnage !

Introduction

- Contexte
 - Continuité des travaux d'ALLICE sur la décarbonation (DCS 1, électrification, gaz décarbonés, récupération de chaleur, etc.)
 - Volonté d'étendre les applications de la première étude
- Objectifs de l'étude :
 - Comparer les différentes solutions de décarbonation sur des cas d'études
 - Observer l'applicabilité des solutions dans d'autres contextes énergétiques
 - Guider les industriels dans la décarbonation de leur procédé

Sommaire

- Méthodologie et principales hypothèses – CETIAT
- Cas 1 : Séchage d'amidon – CETIAT
- Cas 2 : Four de revenu – CETIM
- Cas 3 : Arche de cuisson – CETIAT
- Variabilité en Europe & conclusions - CETIAT



Éric Sénéchal
CETIM



Pierre Richard
CETIAT

Méthodologie

Méthodologie globale et principales hypothèses communes

Méthodologie

- **Étudier les différentes solutions de décarbonation pour des procédés de séchage et cuisson**
 - Efficacité Énergétique
 - Électrification
 - Énergie Renouvelable et de Récupération
- **Illustration sur 3 cas d'étude**
 - Sécheur d'amidon
 - Four de revenu
 - Arche de recuisson
- **Analyse via modélisation**
 - Projection jusqu'en 2050
 - Estimation des CAPEX (dont renouvellement d'équipement), OPEX, et émissions de CO2
- **Variabilité en Europe**
 - Prix et facteurs d'émissions de deux pays européens : Allemagne et Portugal

Sélection des cas d'étude

- **Industrie agro-alimentaire : séchage d'amidon** privilégié
- **Métallurgie : fonderie écartée, four de revenu/recuisson** privilégié
- **Verre : fours écartés car très étudié, arche de recuisson** privilégiée



	Séchage Amidon	Revenu métal.	Recuis verre
Température	180°C	400°C	600°C
Type	Continu	Batch	Continu
Nv. Conso (GWh/an)	45,2	4,3	3,6

Hypothèses de prix et émissions des énergies

Trajectoires Min et Max pour chaque énergie

Principales sources utilisées pour cette étude :

	Prix	Facteur d'émission
Gaz	ADEME / Eurostat (base 2024)	ADEME
Électricité	ADEME / Eurostat (base 2024)	ADEME
ENR	Divers (repris de DCS 1)	ADEME

**Un outil sera fourni pour ajuster les résultats
selon vos projections**

Hypothèses de prix et émissions des énergies

Petites précisions :

$$\text{€} = \text{€}_{\text{constant}} = \text{€}_{2024}$$

(pas de prise en compte de l'inflation)

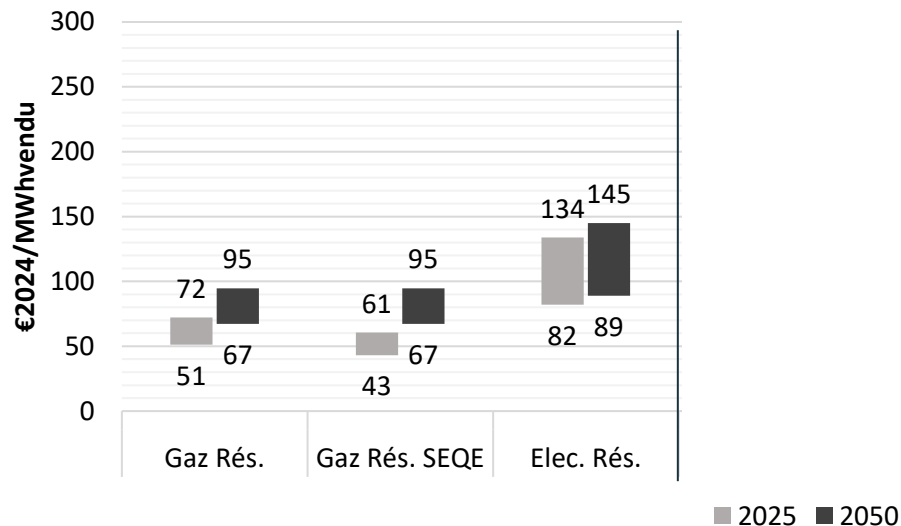
Différentiation SCOPE 1&2 et SCOPE 3_{ENERGIE}

CAPEX « bâti » non pris en compte.

Uniquement les CAPEX des installations énergétiques
(brûleurs, ventilateurs, échangeurs, chaudières...)

Scénarios de prix et émissions des énergies

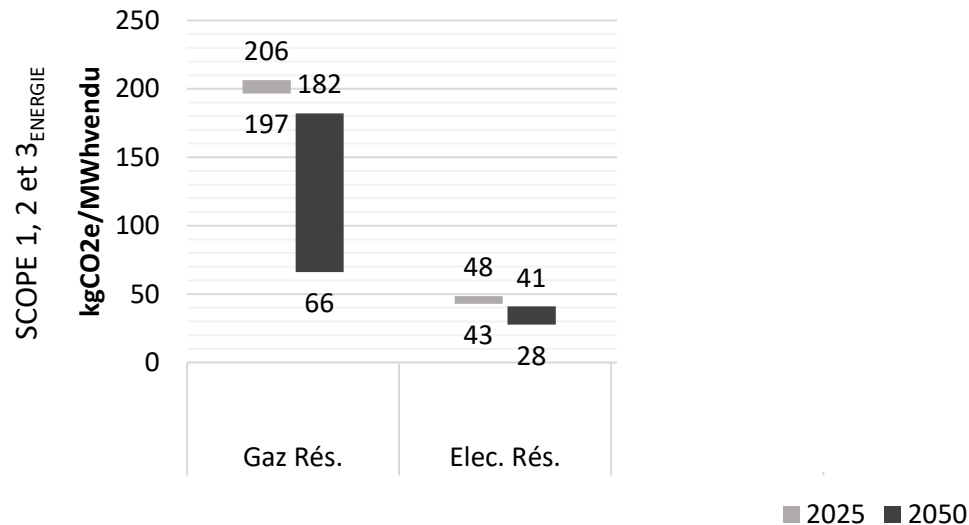
Hypothèses de prix retenus :



Globalement : Énergies traditionnelles augmentent, ENR diminuent ou stagnent

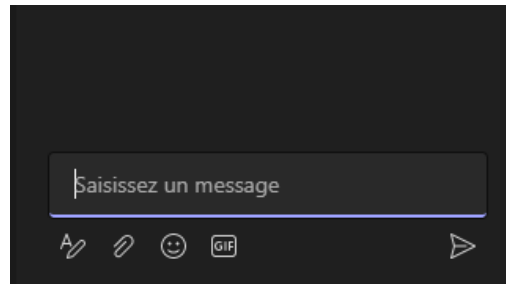
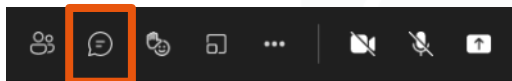
Scénarios de prix et émissions des énergies

Hypothèses de facteur d'émission retenues :



Globalement : Réseau diminuant, ENR identiques

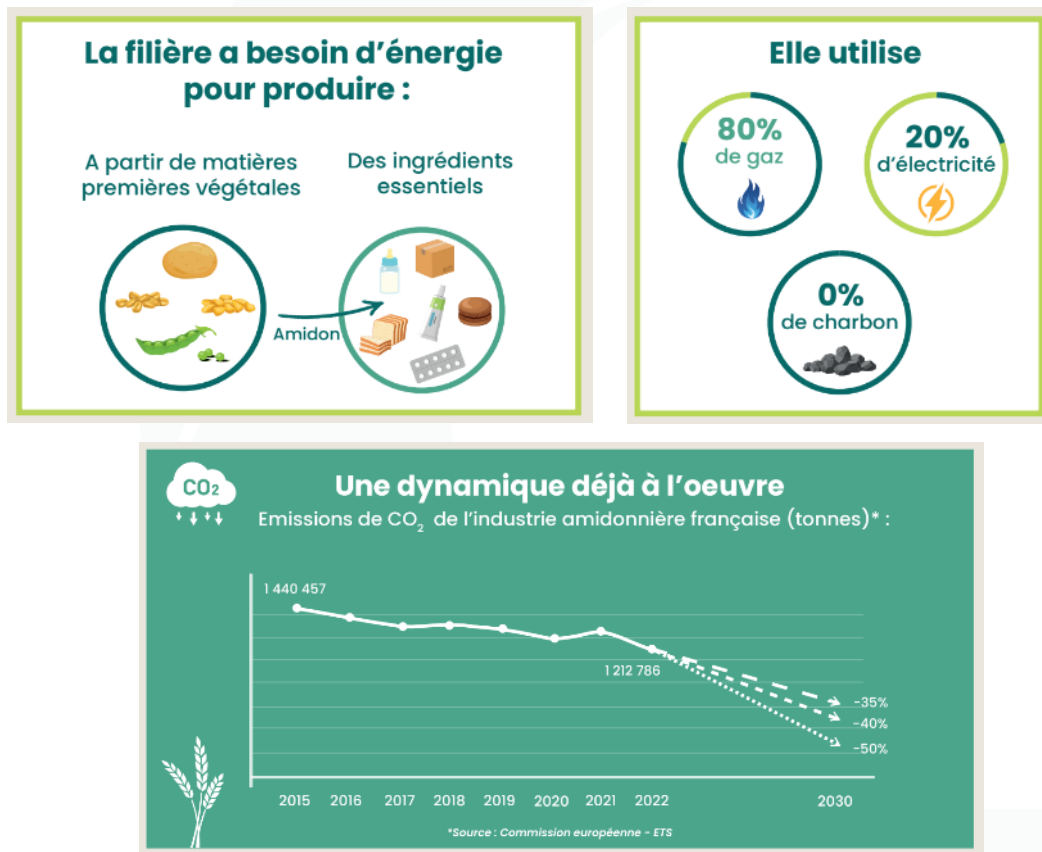
Des questions / remarques ?



Cas 1 : Séchage d'amidon

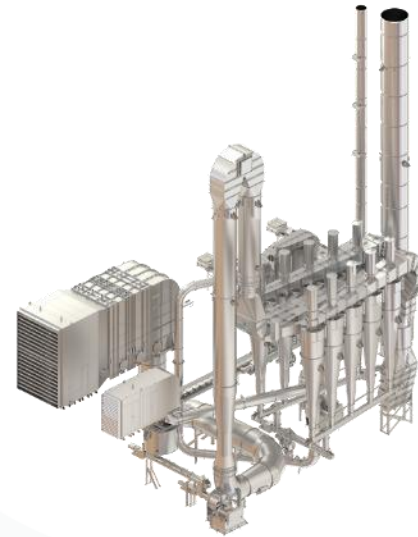
Secteur Agroalimentaire - Amidon

Cas 1 : Séchage d'amidon

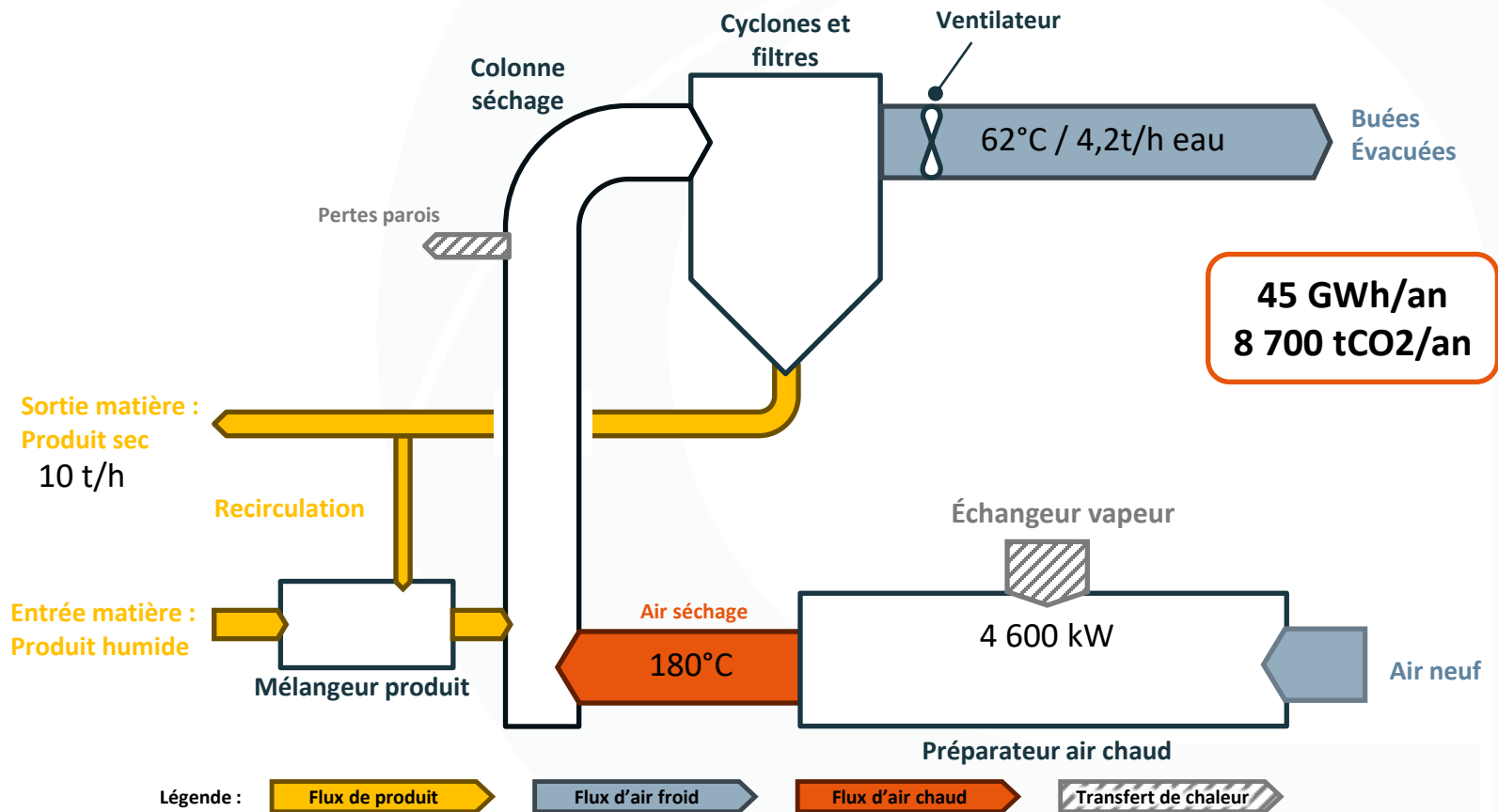


Source : Infographie de USIPA

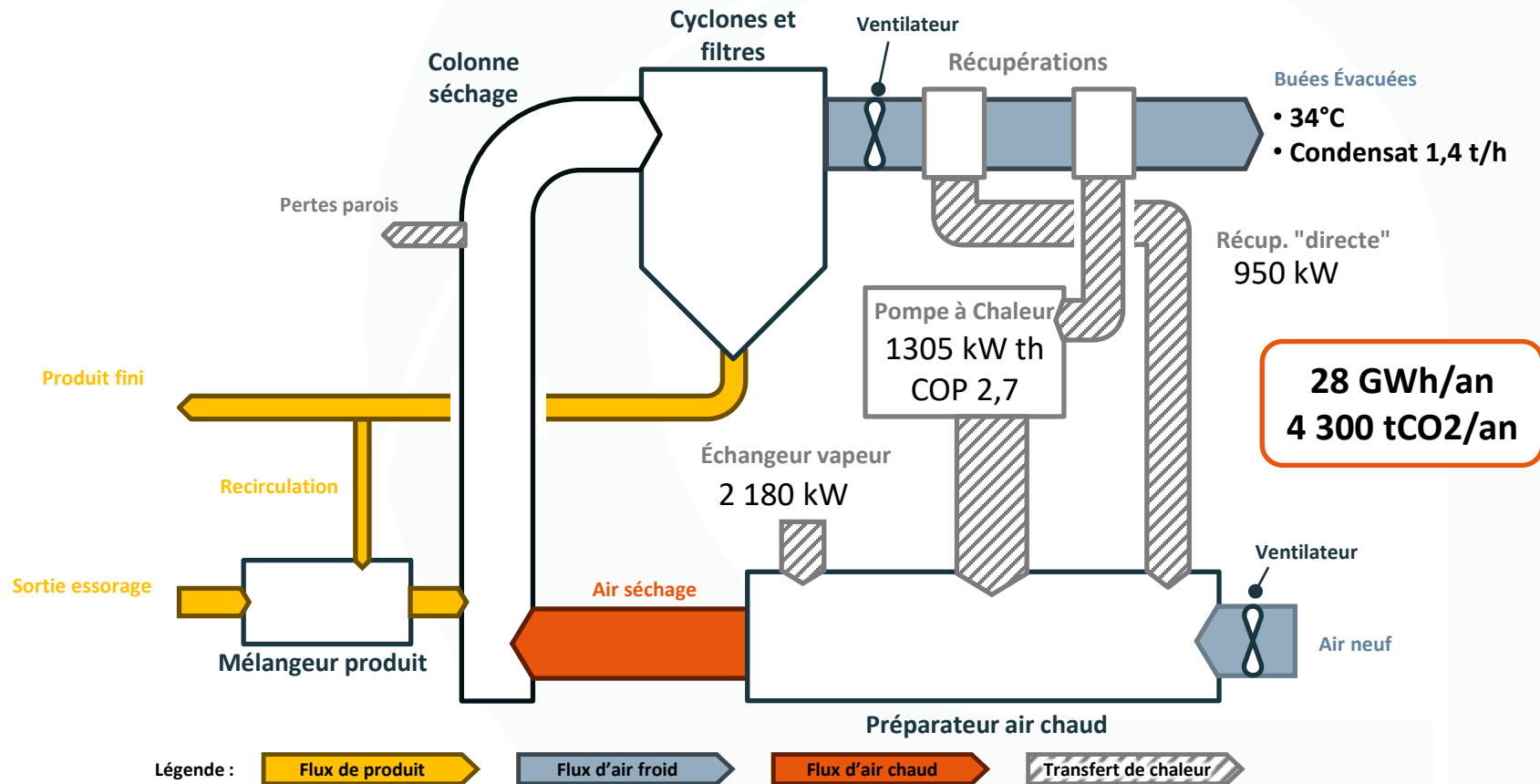
Cas 1 : Séchage d'amidon



Cas 1 : Séchage d'amidon – Situation initiale



Cas 1 : Séchage d'amidon – SoEE



28 GWh/an
4 300 tCO2/an

Cas 1 : Séchage d'amidon – Solutions ENR

- **Solution Électrification (So_Elec)**
 - Mise en place d'une pompe à chaleur très haute température
- **Solution Solaire (So_Sol)**
 - Achat d'énergie sur champ solaire thermique pour production de vapeur
- **Solution Géothermie (So_Géo)**
 - Achat d'énergie sur géothermie profonde pour production de vapeur
- **Solution Biomasse (So_Bois)**
 - Mise en place d'une chaudière biomasse pour production de vapeur

Cas 1 : Séchage d'amidon

Aperçus d'une partie des résultats

Émissions annuelles

	2025		2050	
	Min	Max	Min	Max
Scope 1&2	3 390	3 670	624	3 100
(par rapport à SI 2025)	(-51%)	(-51%)	(-91%)	(-58%)
Scope 3 (énergie)	809	810	904	842
(par rapport à SI 2025)	(-47%)	(-47%)	(-41%)	(-44%)
Total	4 200	4 480	1 530	3 940
(par rapport à SI 2025)	(-51%)	(-50%)	(-82%)	(-56%)

Tableau 21 : Émissions annuelles de GES (en tCO2e) en 2025 et 2050 du Cas 3 – SoEE

Consommations annuelles

Énergie	Total
Gaz Rés. SEQE (MWhPCS/an)	20 200
(par rapport à SI)	(-53%)
Elec. Rés. (MWh/an)	7 860
(par rapport à SI)	(+296%)

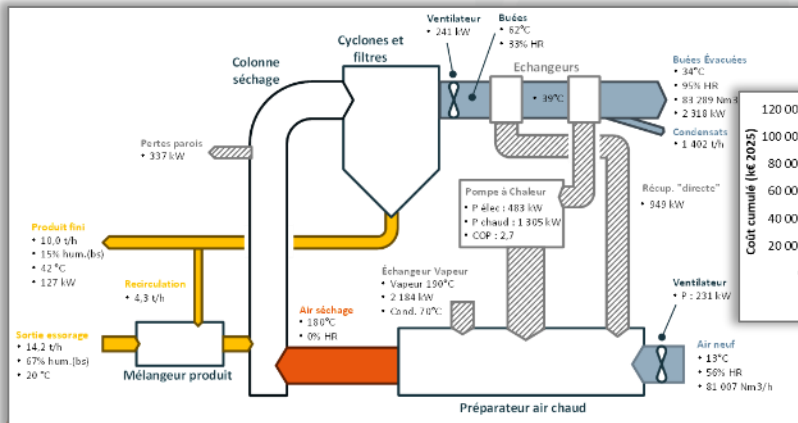
Tableau 20 : Consommations d'énergies annuelles du Cas 3 – SoEE

CAPEX / OPEX

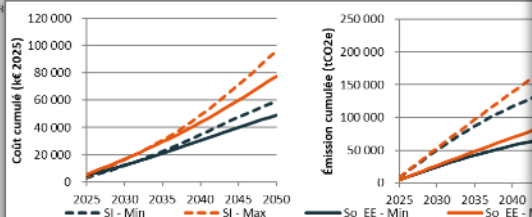
Équipement	Dure de vie (an)	CAPEX (k€2025)	OPEX machine (k€2025/an)
Échangeur vapeur	30	480	9,6
Chaudière gaz	30	130	3,9
Ventilateurs	10	75	2,3
Échangeur Air/Buée*	30	500	25,0
PAC - machine*	30	600	30,0
PAC - échangeur	30	300	15,0
buée*			
PAC - échangeur air neuf*	30	450	13,5
Surplus mise en place complexe*	30	925	0,0
Total		3 460	
(*avec subventions)		(3 044)	99,3

Tableau 22 : Coûts hors énergies considérées pour le Cas 3 – SoEE

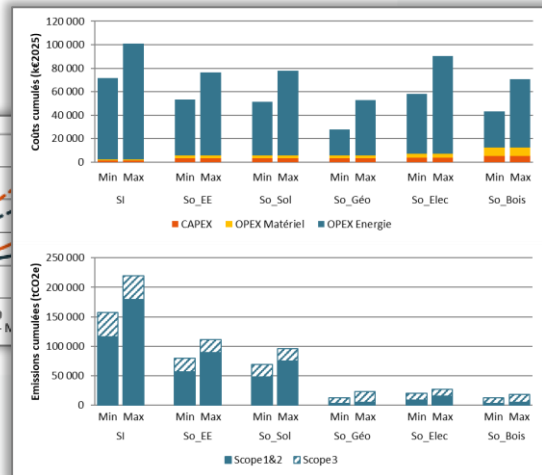
Modèles complets



Coûts et émissions cumulés

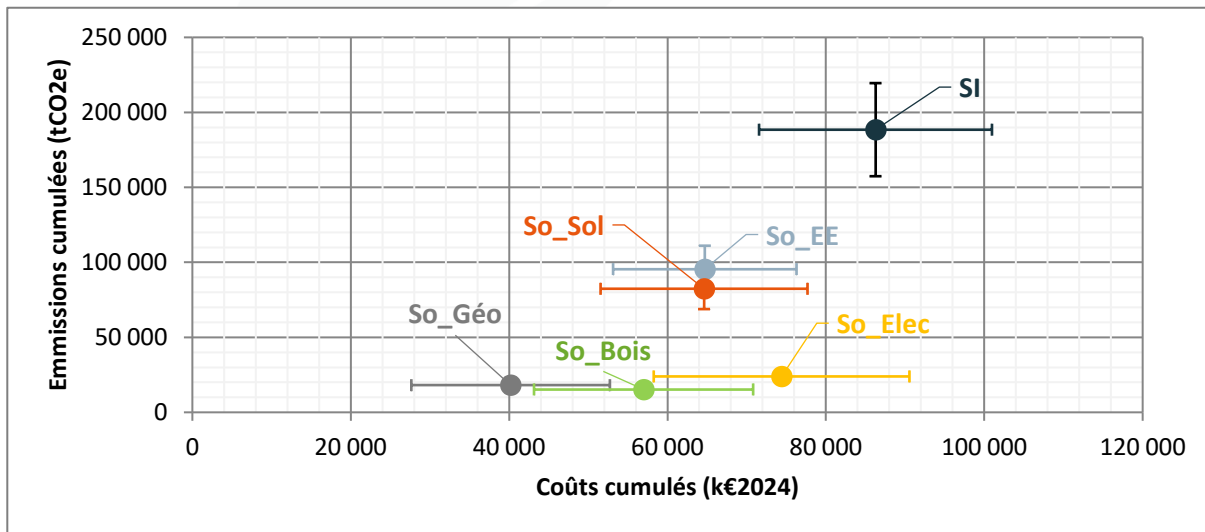


Comparaison des solutions



Cas 1 : Séchage d'amidon – Résultats Globaux

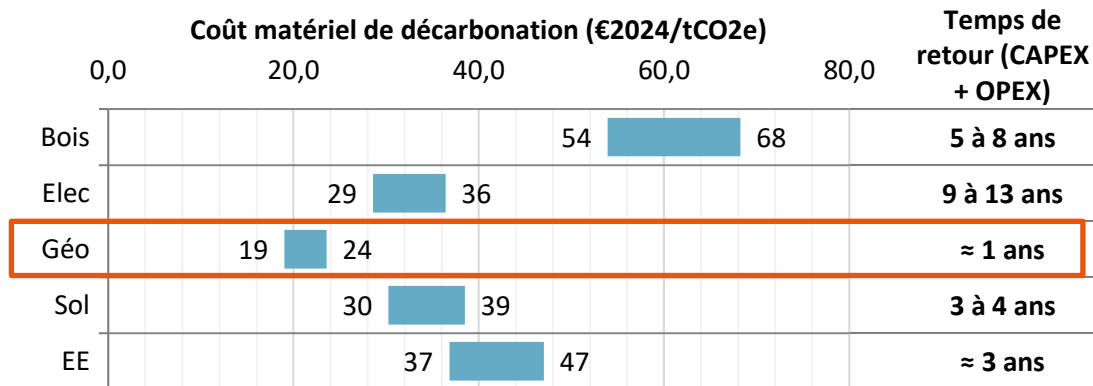
Comparaison de l'ensemble des solutions



- Coût matériel représente entre 8 et 14% du coût global
 - Exception du SoBois 20 à 40% -> Chaudière
- Émissions pour SoGéo et SoBois principalement en SCOPE 3_{ENERGIE}

Cas 1 : Séchage d'amidon – Résultats Globaux

Indicateurs

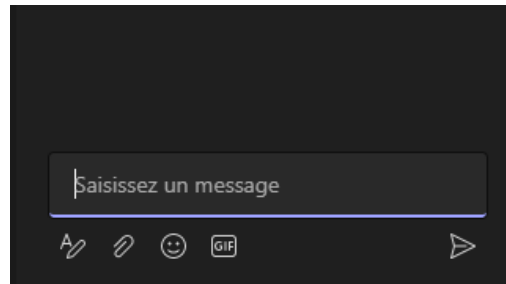
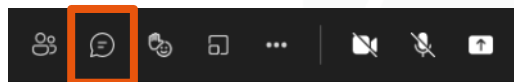


- Solution EE nécessite des subventions pour atteindre les 3 ans
- Rappel : Géothermie et Solaire considèrent un contrat d'achat d'énergie, les coûts d'investissements ne sont pas pris en compte dans le coût de décarbonation.

Cas 1 : Séchage d'amidon – Points clés

- **Gros potentiel d'efficacité énergétique**
 - Possible uniquement par la PAC
 - Des enjeux techniques importants
- **Un coût matériel important avec une bonne rentabilité**
 - Exception de l'électrification avec TRI élevé
- **Solaire : trio besoin process / production / stockage est limitant**
- **Niveaux d'émissions similaires pour Biomasse, Géothermie et Électrification**
 - Avantage pour la Géothermie : uniquement SCOPE 3 et sans CO2 biogénique

Des questions / remarques ?



Cas 2 : Four de revenu

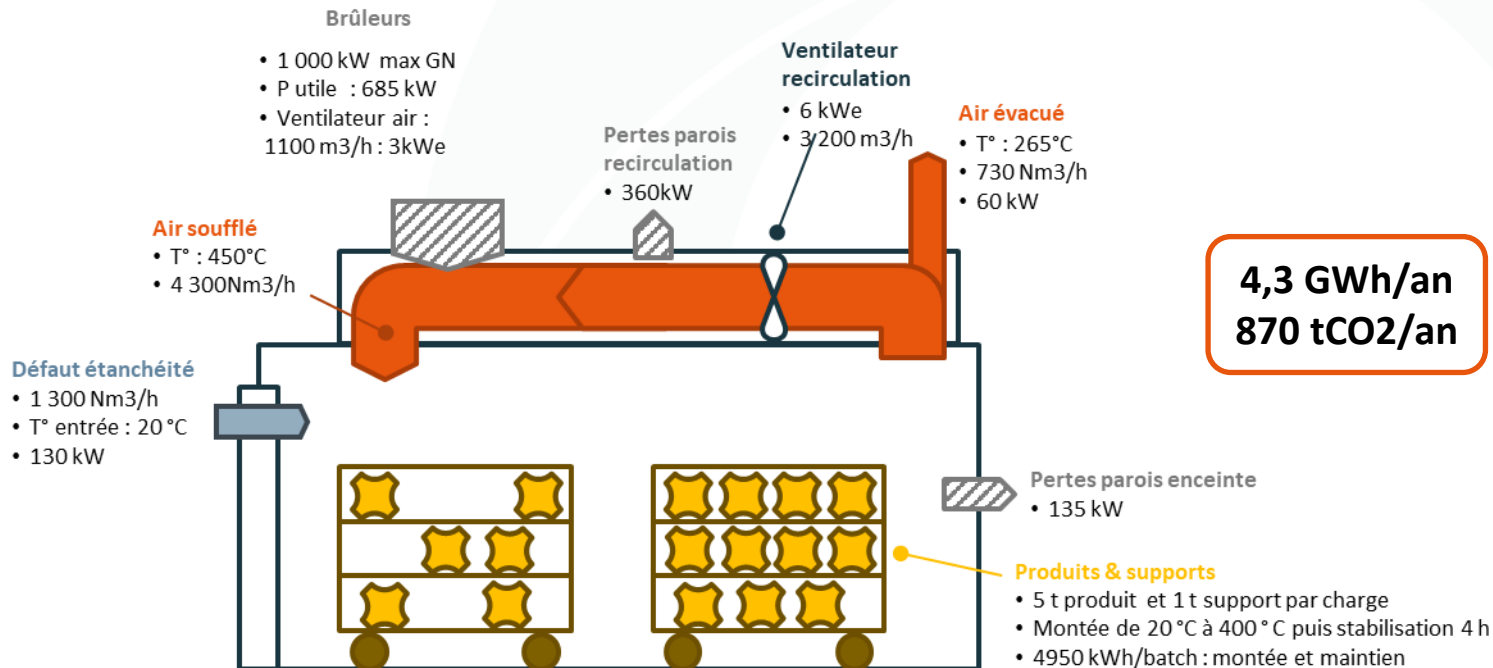
Secteur Métallurgie

Cas 2 : Four de revenu



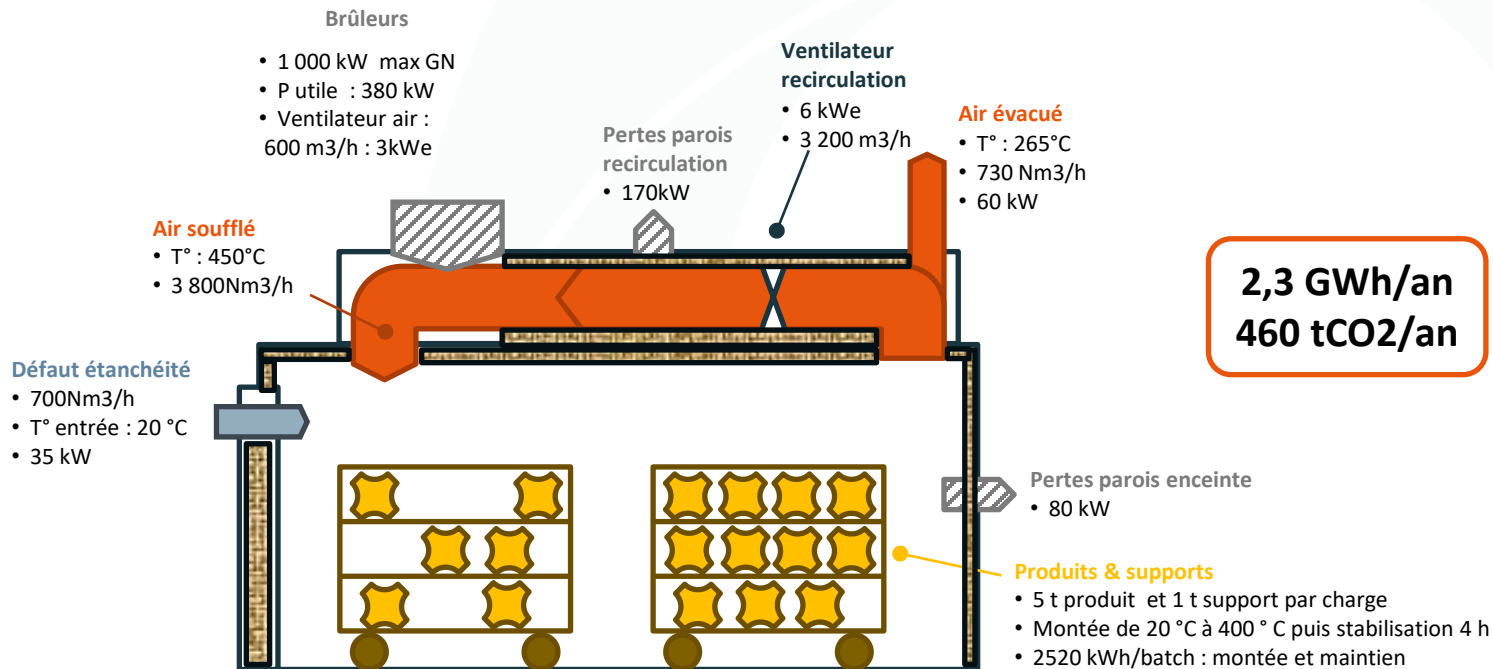
- Opération de traitement thermique de revenu. Pourquoi faire?
 - Réduction de la fragilité du métal
 - Amélioration de la résistance mécanique
 - Diminue la dureté en supprimant des carbures dans les pièces
 - Détend les contraintes résiduelles après tournage, fraisage
 - Stabilisation des dimensions des pièces
- Températures entre 200°C et 600°C en fonction de la nuance d'acier et l'objectif du traitement
- Présent dans de nombreuses entreprises de mécanique (usinage)
- Four de petite taille : électricité, fours de grande taille ou à forte charge : gaz naturel

Cas 2 : Four de revenu- situation initiale



- Four à recirculation air chaud : faible perte par cheminée solution relativement économe
- Parois très épaisses et isolation parois et recirculation faible
- Défaut d'étanchéité important notamment par la porte de chargement

Cas 2 : Four de revenu- situation Efficacité Energétique



- Amélioration de l'isolation des parois du four y compris de la porte
- Mise en place d'isolation importante sur la tuyauterie de recirculation d'air chaud
- Forte amélioration de l'étanchéité de la porte de chargement
- Amélioration du rendement du bruleur

Cas 2 : Four de revenu – Les solutions

- **Solution Hybridation électrique**

- Mise en place de radiants électriques pour assurer le maintien et bruleur gaz pour la montée en T° de la charge ou du four.

- **Solution Électrification**

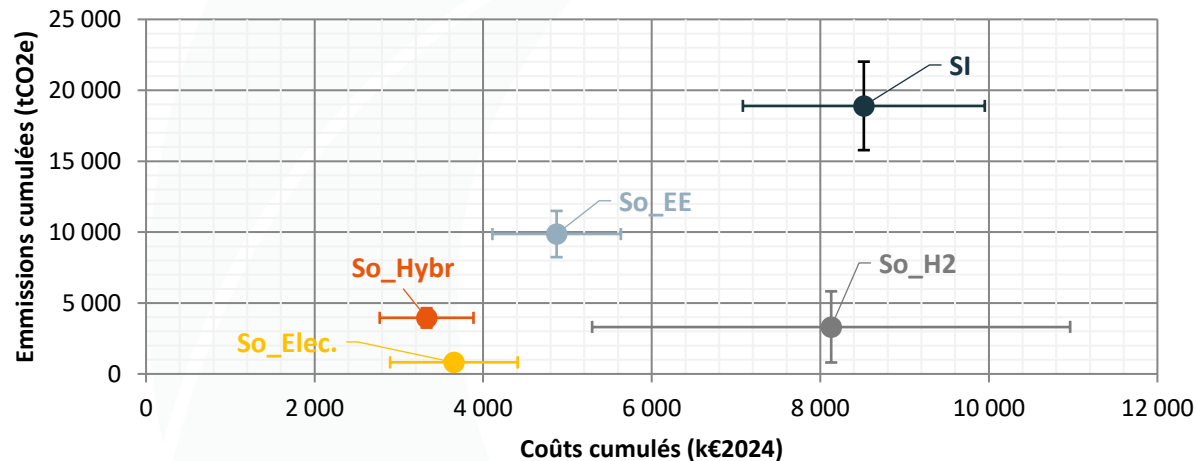
- Remplacement de l'ensemble brûleur par des solutions électriques (radiants et générateur d'air chaud). Arrêt échappement cheminée et recirculation. Brassage mis en place en remplacement recirculation

- **Solution Hydrogène**

- Remplacement des brûleurs gaz par des brûleurs 100 % hydrogène. Maintien recirculation

Cas 2 : Four de revenu – Résultats Globaux

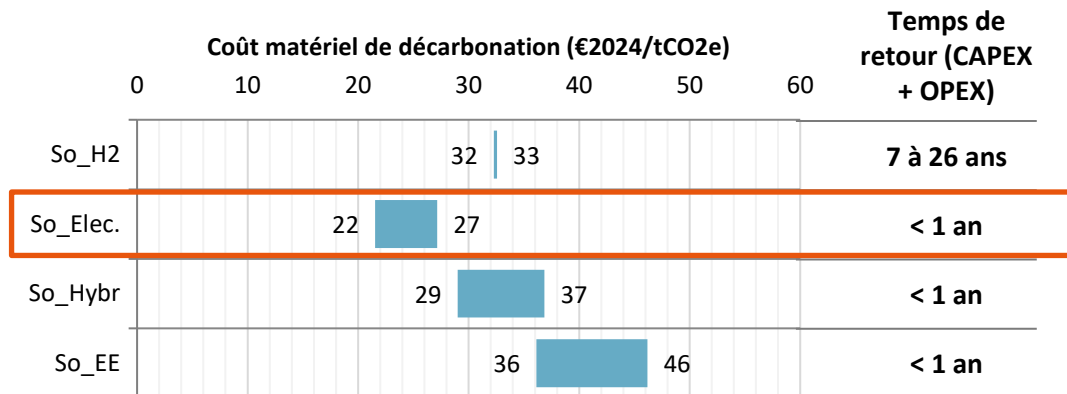
Comparaison de l'ensemble des solutions



- Pas de solution ENR identifiée
 - Température trop élevée
- Coût matériel représente entre 5 et 25% du coût global
- Électrification apporte peu de gain énergétique supplémentaire par rapport à l'hybridation

Cas 2 : Four de revenu – Résultats Globaux

Indicateurs

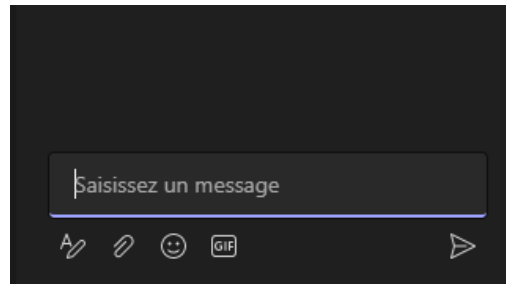
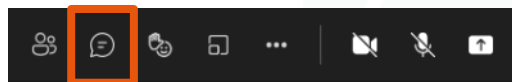


- Solution EE plus mauvaise rentabilité environnementale
 - Dû à la conservation du gaz
- Solution Hydrogène potentiellement non rentable

Cas 2 : Four de revenu – Points clés

- **Gros potentiel d'efficacité énergétique**
 - Se met en place lors du renouvellement d'équipement. Aides financières possibles pour l'isolation du four prises en compte dans le calcul
- **Un coût matériel important**
- **Températures trop élevées pour des énergies renouvelables**

Des questions / remarques ?

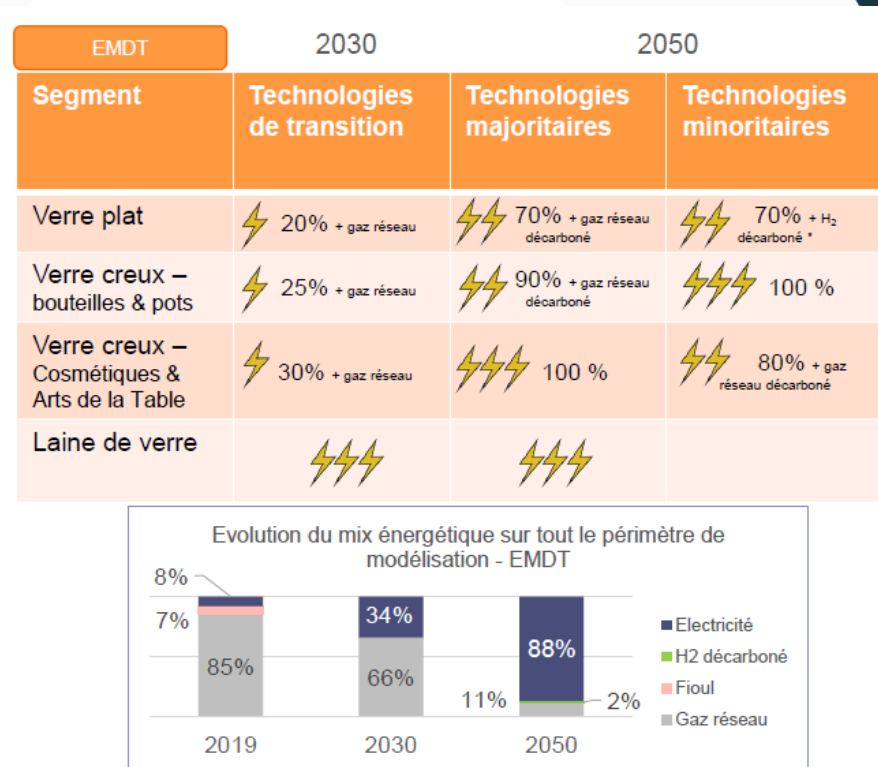


Cas 3 : Arche de recuisson

Secteur Verre

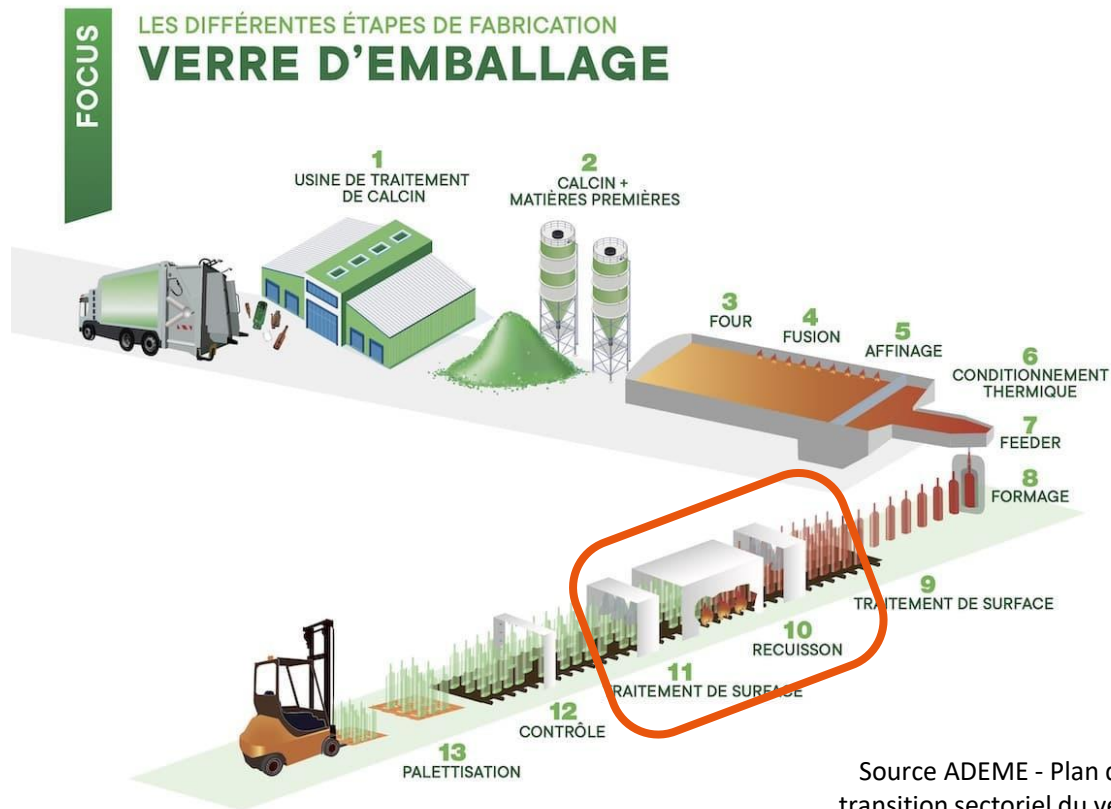
Cas 3 : Arche de recuisson

- Secteur du verre : un des secteurs prioritaires dans la décarbonation
- 71% des émissions pour le four
- Le reste réparti entre feeder et recuisson
- La filière mise sur l'électrification



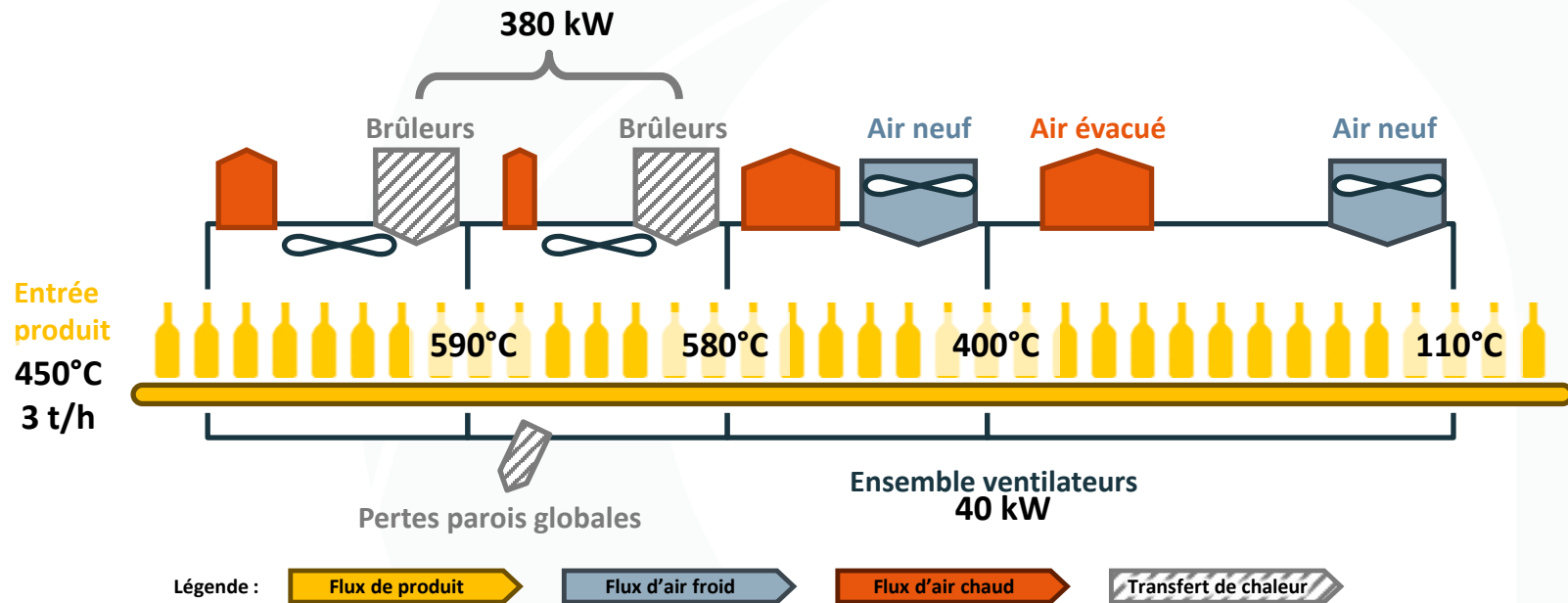
Source ADEME - Plan de transition sectoriel du verre

Cas 3 : Arche de recuisson



Source ADEME - Plan de transition sectoriel du verre

Cas 3 : Arche de recuisson



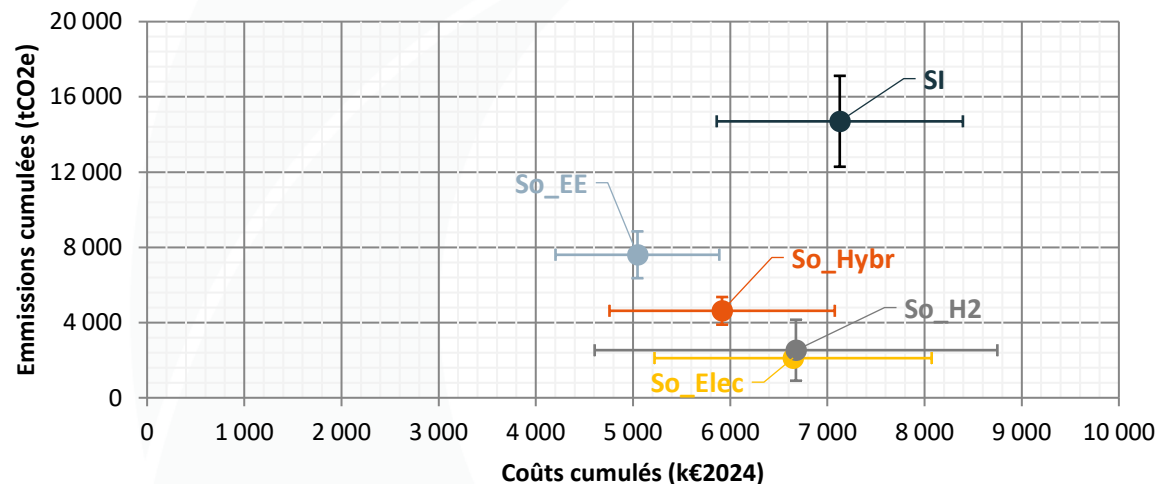
3,6 GWh/an
680 tCO₂/an

Cas 3 : Arche de cuisson – Les solutions

- **Solution Efficacité Énergétique**
 - Surisolation, brûleurs performants, augmentation du brassage, récupération de l'air de refroidissement comme air comburant
 - -50% d'émissions
- **Solution Hybridation électrique**
 - Remplacement des radiants gaz par radiants électriques
- **Solution Électrification**
 - Remplacement de l'ensemble brûleurs par des solutions électriques (radiant et générateur d'air chaud)
- **Solution Hydrogène**
 - Remplacement des brûleurs gaz par des brûleurs hydrogènes

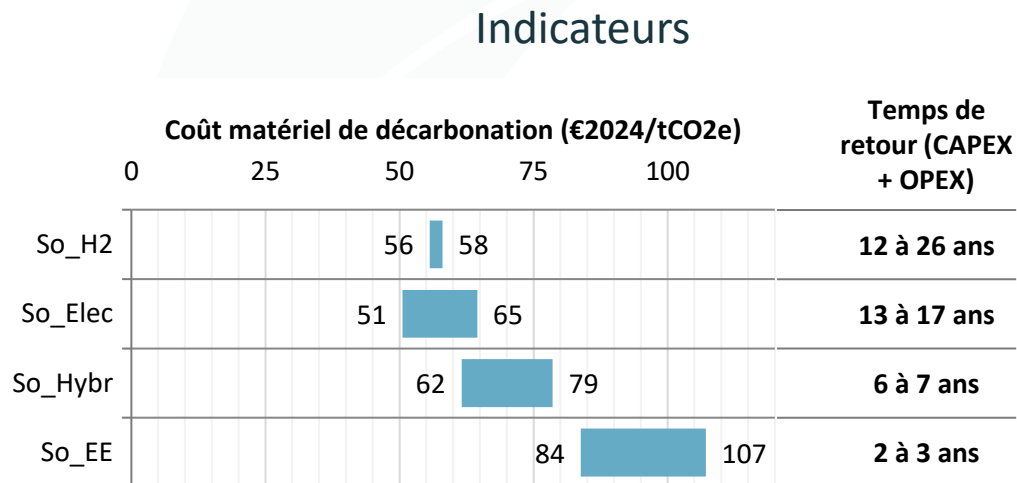
Cas 3 : Arche de cuisson – Résultats Globaux

Comparaison de l'ensemble des solutions



- Pas de solution ENR identifiée
- Coût matériel représente entre 8 et 18% du coût global
- Électrification n'apporte pas de gain énergétique par rapport à l'efficacité énergétique.

Cas 3 : Arche de cuisson – Résultats Globaux

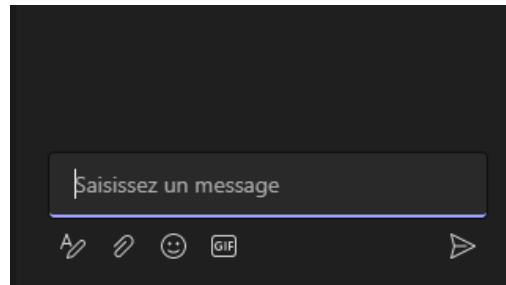
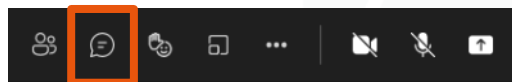


- Solution EE meilleur rentabilité économique, mais pire rentabilité environnementale
 - due à la conservation du gaz

Cas 3 : Arche de cuisson – Points clés

- **Gros potentiel d'efficacité énergétique**
 - Se met en place lors du renouvellement d'équipement
- **Un coût matériel important avec une bonne rentabilité**
 - Exception de l'électrification avec TRI élevé
- **Températures trop élevées pour des énergies renouvelables**
- **Au-delà de l'efficacité énergétique, la décarbonation se fera avec un coût global plus élevé**
 - Que ce soit par électrification ou utilisation de gaz vert

Des questions / remarques ?

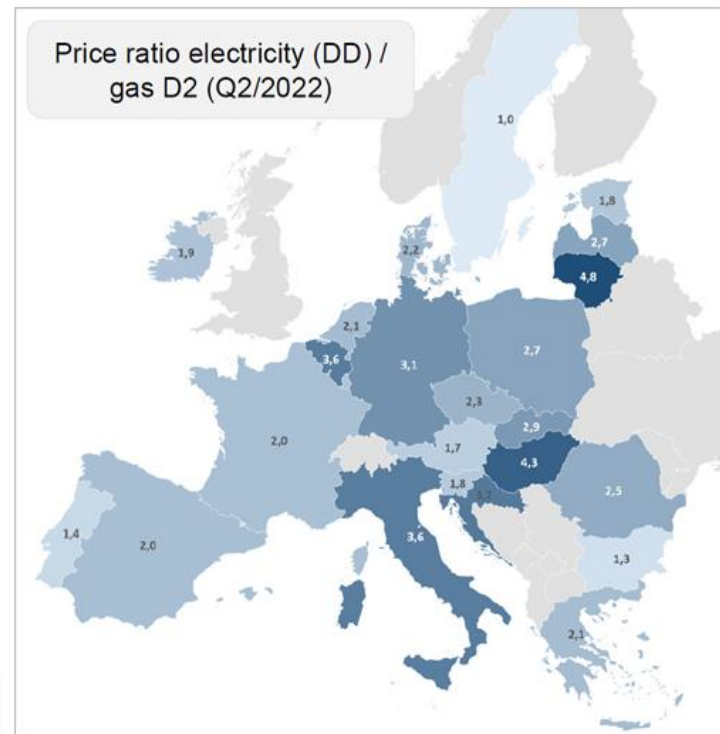


Ailleurs en Europe

Que donnent les résultats dans d'autres pays ?

Variabilité en Europe

- Objectif : confronter les cas d'études à des caractéristiques énergétiques différentes
 - Notamment sur l'électricité
- Sélection de pays :
 - Fonction du ratio de prix élec / gaz (2024)
 - Ratio fort : Allemagne (2,50)
 - Ratio faible : Portugal (1,46)
 - (Rappel : France à 1,75)



Source: Öko-Institut based on Eurostat data

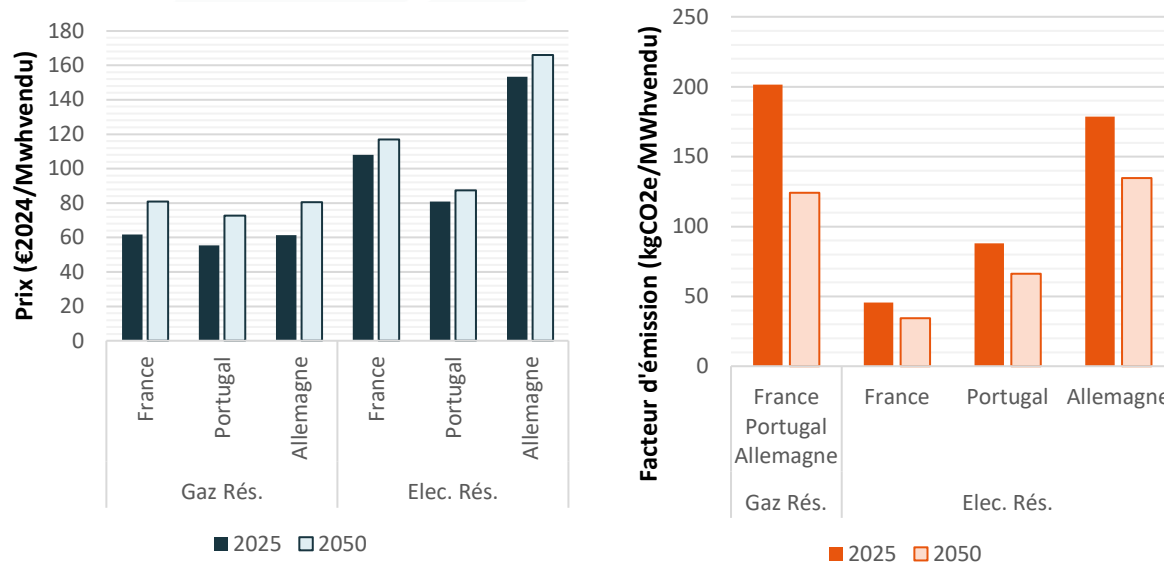
Variabilité en Europe

- Hypothèses d'évolution des prix et facteurs d'émission
 - **Reprise des évolutions moyennes en France** appliquées aux références 2024 des autres pays
- Sources des données des références 2024 (pour les deux pays) :

	Prix	Facteur d'émission
Gaz	Eurostat	Identique France
Électricité	Eurostat	ENTSO-E

Variabilité en Europe

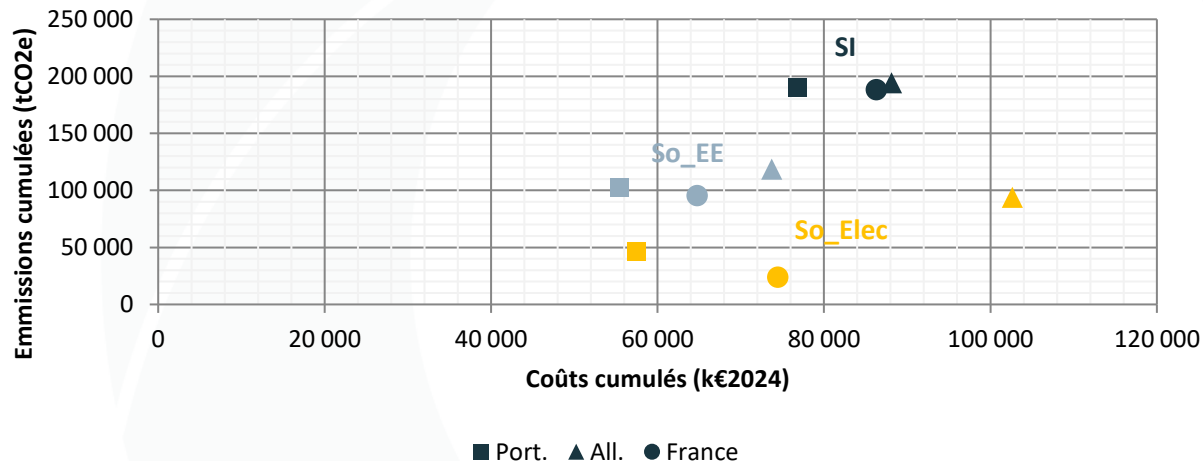
Hypothèses retenues



- Gaz : relativement équivalent à la France
- Électricité : fortes différences, hypothèses de décarbonation pessimistes

Variabilité en Europe

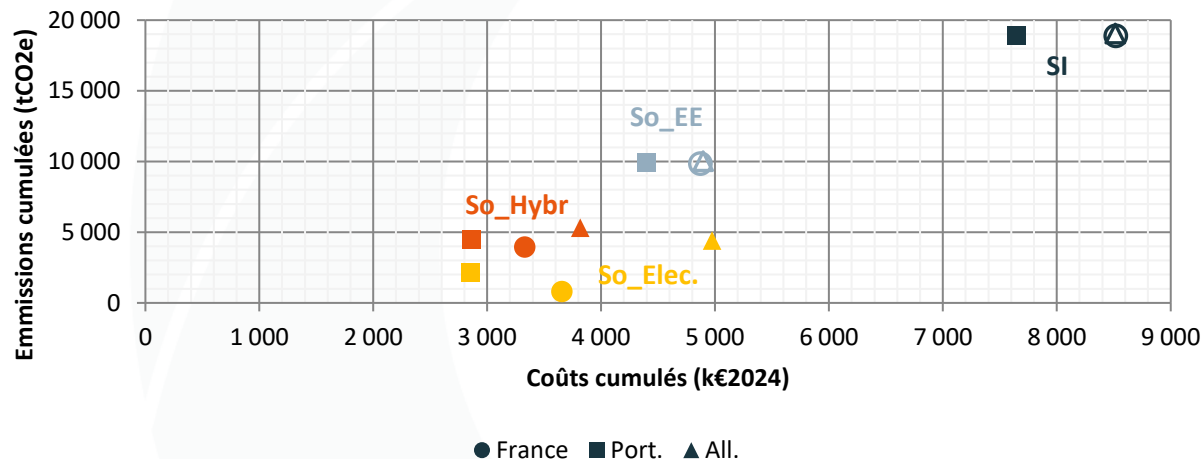
Application sur le cas 1 : Séchage d'amidon



- Portugal : l'électrification a moins d'intérêt environnemental mais a un coût global similaire
- Allemagne : aucun intérêt à l'électrification

Variabilité en Europe

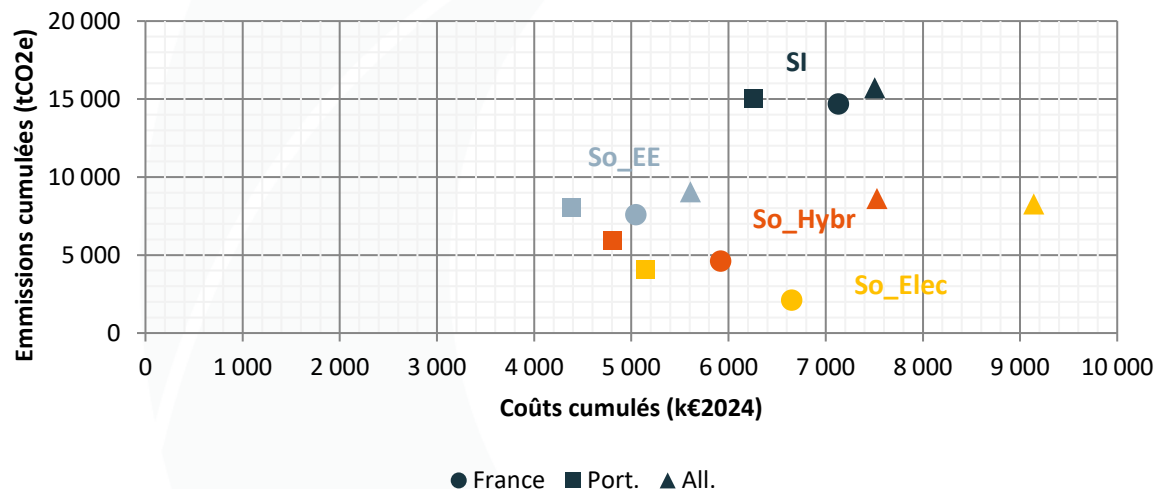
Application sur le cas 2 : Four de revenu



- Portugal : l'électrification est la meilleure option
- Allemagne : taux d'électrification optimum à trouver

Variabilité en Europe

Application sur le cas 3 : Arche de recuisson



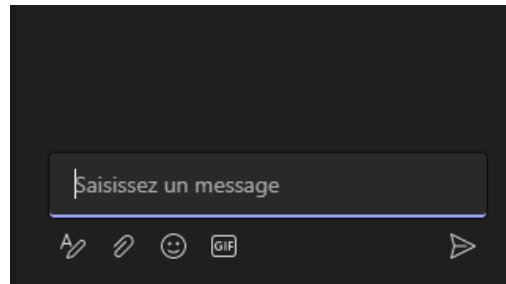
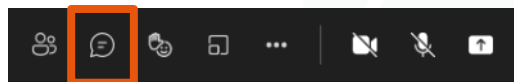
- Portugal : l'électrification a moins d'intérêt environnemental, aspect économique moins contraignant
- Allemagne : aucun intérêt à l'électrification

Variabilité en Europe

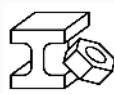
Remarque générale :

- Pour les pays avec électricité très carbonée (ex. : Allemagne), l'électrification n'a un sens que si elle permet une baisse des consommations : PAC, suppressions de fumées HT.
- Ratio de prix élec/gaz faible = électrification plus viable économiquement

Des questions / remarques ?



Conclusions et perspectives



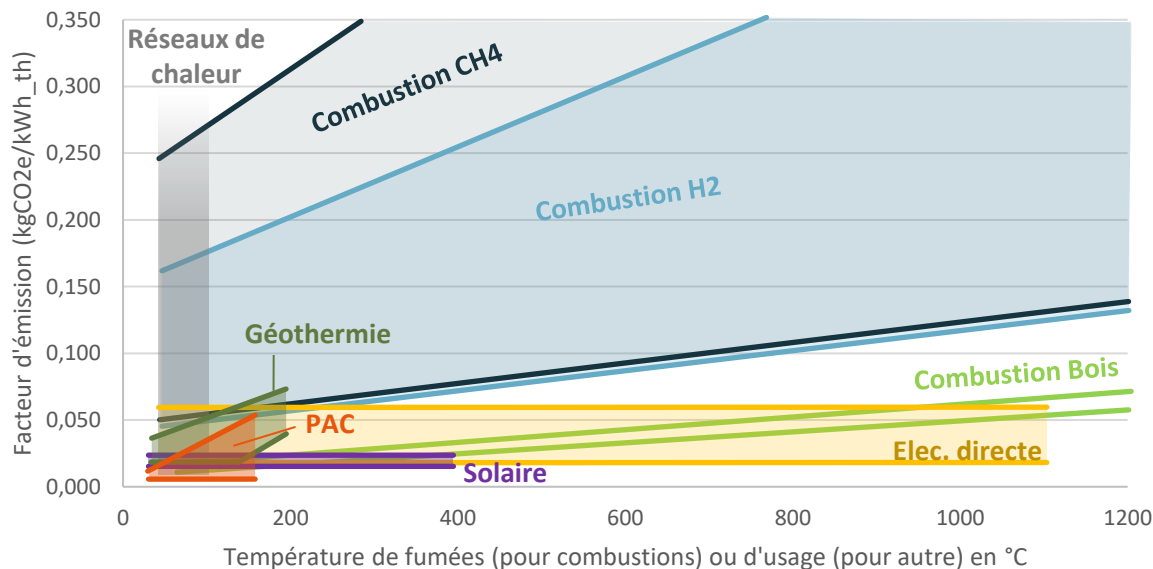
	Séchage Amidon	Revenu métal.	Recuis verre
Température	180°C	400°C	600°C
Type	Continu	Batch	Continu
Nv. Conso (GWh/an)	45,2	4,3	3,6
Meilleure solution CO2	Bois  -92%	Elec  -96%	Elec  -86%
Meilleure solution €	Géo  -55%	Hybr  -61%	EE  -29%

Conclusions et perspectives

- **L'efficacité énergétique reste première source de gains :**
 - (Changement de technologie / Passage en continu)
 - Brassage / surisolation
 - Récupération d'énergie
 - Gain économique et environnemental
- **Hybridation, d'autres points à considérer :**
 - Capacité d'approvisionnement électrique du site
 - Selon le niveau de consommations : optimisation de la facturation
 - Effacement, prix spot...
 - Mix énergétique valorisable

Conclusions et perspectives

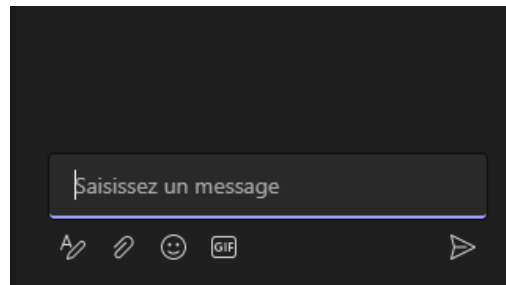
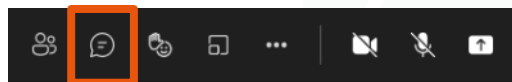
- Point de vue émissions Électrification vs ENR : deux facteurs clés
 - La source d'énergie
 - Le rendement énergétique des systèmes



Conclusions et perspectives

- **La disponibilité des ressources**
 - Des solutions ENR pas toujours applicables
 - Les contrats à GO : une solution limitée, à combiner avec l'EE
- **Quel périmètre d'émissions de CO2 ?**
 - Considération des ACV des systèmes d'efficacité énergétique ?
 - Considération des émissions de CO2 biogénique (biocombustible) ?
- **Autres impacts environnementaux**

Des questions / remarques ?



Actualités ALLICE

Vos prochains rendez-vous ALLICE

 <i>Webinaire adhérents ALLICE</i>	 <i>Réunion des adhérents ALLICE</i>	 <i>Rencontre Industriels- laboratoire</i>	 <i>Rencontre partenaire</i>	 <i>Rencontre partenaire</i>
20 mars Décarbonation des procédés de cuisson et de séchage - volet 2	25 mars Visite site TERREAL (Chagny)	1 avril Visite du LRGP (Nancy)	3 avril Forum national des Eco-entreprises du PEXE (Paris)	14-15 mai MIX.E Salon du mix énergétique neutre (Lyon)
 <i>E-café EUROPE</i>	 <i>Réunion des adhérents ALLICE</i>	 <i>ALLICE congress 2025</i>	 <i>Réunion des adhérents ALLICE</i>	 <i>Rencontre partenaire</i>
23 mai RDV Européen	12 juin Club PRIME Réunion plénière	23-24 Sept Congrès biennal 2025 (Paris)	20 novembre Club PRIME Réunion plénière	25-26 novembre PCH Meetings (Lyon)

MERCI À TOUTES ET À TOUS !

Etude réalisée par :

- Pierre Richard (CETIAT), Eric Sénéchal (CETIM)
pierre.richard@cetiat.fr
06 18 88 45 41

Etude pilotée par :

- Léo Pasquier – Alliance ALLICE

