

L'hydrogène pour la cuisson des matériaux en terre cuite

Janv.
2025

Une voie de décarbonation pour cette industrie
nécessitant une cuisson haute température -
APRED – projet HYDETOP

1. Contexte du projet

L'industrie des Tuiles et Briques est une industrie de production qui utilise comme combustible principal le gaz naturel, source d'émissions en CO₂. Pour décarboner son procédé sans avoir à le modifier entièrement, elle doit chercher à substituer ce gaz fossile par un gaz décarboné tout en maintenant la qualité des produits. L'utilisation d'hydrogène renouvelable ou bas carbone comme combustible pourrait être une solution.

1.1. Le contexte du projet : la décarbonation pour l'industrie de la terre cuite

L'industrie des Tuiles et Briques est une industrie de transformation, intensive en énergie, qui émet du CO₂ pour la fabrication de ses produits, environ 700 000 tonnes de CO₂/an en France pour une production annuelle d'environ 4 millions de tonnes. 75 % de ces émissions sont liées à l'utilisation de gaz naturel (GN) pour l'apport de chaleur au séchage et à la cuisson. La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) vise une neutralité carbone à horizon 2050 avec pour objectifs d'ici 2030 de réduire de 40 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à 1990, de réduire de 30 % la consommation en énergies fossiles par rapport à 2012 et de porter à 32 % la part d'énergies renouvelables dans la consommation totale. Parmi les 130 sites industriels français du secteur de la terre cuite, 43 d'entre eux sont soumis au système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SEQE ou ETS) qui ont vocation à disparaître à horizon 2030, impliquant pour ces sites la nécessité d'une réduction importante de leurs émissions de CO₂ pour rester compétitifs. Le secteur emploie 4 400 salariés répartis sur toute la France et génère plus de 100 000 emplois dans la filière de la construction qui pourraient être impactés.

Depuis 2000, les industriels ont diminué de 14 % leurs émissions spécifiques en CO₂. Cette réduction est liée à l'amélioration de l'efficacité énergétique du procédé avec la mise en place de récupérations de chaleur excédentaire des fours vers les séchoirs, l'amélioration de la conception et du fonctionnement des installations, l'instrumentation et la régulation. Ces efforts restent cependant insuffisants pour atteindre les objectifs de la LTECV.

L'utilisation de gaz renouvelable en substitution du GN est une voie techniquement plus transposable par retrofit au procédé actuel que l'électrification.

Le dihydrogène (H₂) renouvelable ou bas carbone peut être une alternative au GN car c'est un vecteur énergétique décarboné et propre. Néanmoins, son utilisation comme combustible dans les fours de cuisson soulève de nombreuses questions : son pouvoir calorifique volumique trois fois plus faible (quantités de gaz nécessaires et impacts sur les dispositifs de combustion), son explosivité (aspects sécurité), sa disponibilité sur le territoire, son coût et l'impact sur les produits et les fumées des nouveaux constituants générés par la combustion de H₂ (formation importante de vapeur d'eau, dégagement de NOx).

1.1. Les enjeux du projet

Le projet a pour enjeu l'impact de la cuisson à l'hydrogène de tuiles et briques sur le procédé et sur les produits :

- Les caractéristiques et la stabilité de la flamme : L'hydrogène a des propriétés physicochimiques très différentes du gaz naturel impactant les propriétés de la flamme.
- Les organes de combustion et les paramètres de cuisson :

Les brûleurs utilisés en terre cuite ont certaines spécificités en fonction de leur localisation dans le four :

- Les brûleurs de type jet latéraux ou de voûte utilisés en zone de montée en température (avant feu) qui ont des vitesses de propagation de flamme élevées apportant une forte convection.
- Les brûleurs de type fleurets utilisés à la température maximale (zone de feu) qui ne fonctionnent qu'au-delà de 750°C, température d'auto-combustion du gaz naturel. Le gaz et l'air sont injectés dans le four sans chambre de combustion préalable.

Ces différents brûleurs sont optimisés pour un usage au gaz naturel mais peuvent être également utilisés pour la combustion de gaz à plus faible pouvoir calorifique de type biogaz. Ils n'avaient jamais été testés avec de l'hydrogène que ce soit en mix ou pur.

- La qualité des produits cuits : Les propriétés d'usage des produits sont fortement liées à leur cuisson. Les produits doivent atteindre leur bon état de cuisson conditionnant leurs transformations physicochimiques qui leur confèrent leurs propriétés mécaniques, esthétiques et leur durabilité dans le temps. L'atmosphère de cuisson est également importante pour les produits destinés à être apparents comme les tuiles ou les plaquettes car elle peut influencer sur leur coloration.
- La composition des fumées : La combustion d'hydrogène entraîne la formation de NOx (gaz polluants dont les rejets sont réglementés) et une augmentation de la quantité de vapeur d'eau pouvant impacter, en fonction de sa teneur, le comportement à la cuisson des produits et la température de condensation des fumées.
- Les coûts de production : Le coût de l'énergie représente environ 25 % du coût de production d'un produit de terre cuite qui est un matériau de grande diffusion à faible valeur ajoutée. La disponibilité et le mode d'approvisionnement en hydrogène en fonction des besoins et des zones géographiques auront un impact sur son coût.

2. 2. Méthodologie

Pour répondre aux objectifs, le projet a été divisé en différents lots dont les principaux étaient :

- Une étude menée par le laboratoire CORIA-CNRS sur la compréhension de l'impact de l'intégration d'hydrogène sur le comportement de la flamme. Dans un premier temps, sur le site CLEIA de Belfort, 4 types de brûleurs utilisés en terre cuite ont été testés à leurs puissances nominales et maximales pour différents mélanges CH₄/H₂. Lors de ces essais, des mesures de chimiluminescence ont été réalisées. Les brûleurs de type jet latéral et de type jet de voûte ont été testés à l'air libre sur un banc d'essai mis au point pour l'occasion et le brûleur de type flegret a été testé dans une cellule d'essai spécifique du fait de son fonctionnement en auto-combustion. Pour ce dernier cas de figure, les mesures de chimiluminescence n'ont pas pu être exploitées à cause d'une visibilité réduite de la flamme liée aux radiations des parois et à son positionnement. A la suite de ces essais sur site industriel, une étude plus fondamentale a été réalisée au laboratoire CORIA pour mettre en évidence, pour un brûleur choisi, de type jet de voûte, le mode de stabilisation de la flamme et ses variations en fonction de la composition du mélange combustible méthane (CH₄ - H₂) depuis le méthane jusqu'à l'H₂ pur.
- La réalisation de cuissons avec des produits pour différentes mix GN/H₂. Ces essais ont été réalisés dans un four pilote CLEIA pouvant cuire des produits industriels. En amont de cette campagne d'essais, la cellule a été adaptée par CLEIA pour permettre l'intégration d'un réseau H₂ pour la réalisation des mix tout en tenant compte des aspects approvisionnement et mise aux normes de sécurité en lien avec le stockage et à l'usage de cet hydrogène. Les produits obtenus ont ensuite été testés pour évaluer leurs propriétés d'usage dans les laboratoires du CTMNC.
- Une étude technico-économique a également été menée en collaboration avec des fournisseurs d'hydrogène renouvelable.

3. Bilans principaux / Résultats obtenus

3.1. Comportement de la flamme en fonction des mix

3.1.1. Campagne d'essai de fonctionnement des brûleurs à l'air libre

La campagne d'essais a eu lieu sur le site CLEIA-JETFLAM de Belfort du 3 au 7 octobre 2022. L'objectif de cette campagne a été de tester une série de 4 brûleurs JetFlam (brûleur de type jet latéral, jet latéral allongé, brûleurs de type jet de voûte (Topjet) de 80 kW et 110 kW) pour différentes compositions de gaz, caractérisées par le paramètre α taux volumique de H_2 dans le mélange, dont la définition est :

$$\alpha = \frac{Vol_H2}{Vol_total_combustible}$$

Les brûleurs à gaz de type Jet latéral sont des brûleurs à air soufflé, où l'orifice de l'ouvrage se rétrécit en sortie et les gaz brûlés sortent à très grande vitesse, de l'ordre de 260 m/s à la puissance maximum (150 kW et jusqu'à 200 kW). Cette vitesse provoque dans l'ensemble du four un brassage intense des gaz et un échange thermique renforcé avec la charge. Ils sont utilisés pour la montée en température des produits de l'ambient jusqu'à 750-800°C (zone d'avant feu).

Les brûleurs à gaz de type Jet de voûte ou Top jet sont des brûleurs à grande vitesse de sortie des gaz de combustion à sa puissance nominale (jusqu'à 170m/s). Ils ont été développés pour l'amélioration des qualités de cuisson. Ils équipent également la zone avant-feu d'un four en voûte de façon à améliorer l'homogénéité en température.

Pour chaque brûleur, 6 combustibles ont été testés depuis le GN seul jusqu'au H_2 pur en passant par différentes compositions de mélanges CH_4-H_2 ($\alpha=0$; 0,06 ; 0,2 ; 0,5 et 0,75 et 1). La puissance thermique a également été modifiée depuis la puissance minimale vers la puissance maximale en passant par les conditions nominales de chaque brûleur.

Lors des essais, le débit de gaz combustible a été mesuré à l'aide d'un compteur volumique et le débit d'air amené par le ventilateur a été mesuré par un anémomètre. Les conditions opératoires sont ainsi caractérisées par la puissance thermique et le facteur d'excès d'air λ dont la définition est :

$$\lambda = \frac{\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}}{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{stoecho}}$$

avec $\dot{m}_{air}$ le débit massique d'air et $\dot{m}_{fuel}$ le débit massique de combustible.

Pour chaque condition opératoire des séries de 500 images de chimiluminescence ont été enregistrées à l'aide d'une caméra intensifiée (emICCD) de manière à étudier la topologie de la flamme. Trois bandes spectrales ont été sélectionnées pour caractériser les structures de ces différentes flammes. Les bandes spectrales correspondant à l'émission des radicaux OH^* (310 nm) et CH^* (410 nm) ont été choisies pour localiser la zone de réaction des flammes contenant plus ou moins d'espèces carbonées.

Pour synthétiser les résultats, une analyse menée sur le brûleur Jet latéral est effectuée pour une variation de α . La probabilité de présence de flamme et la longueur de la flamme (Figure 1) sont déterminées après une étape de traitement des images instantanées (filtrage puis binarisation par seuil automatisé).

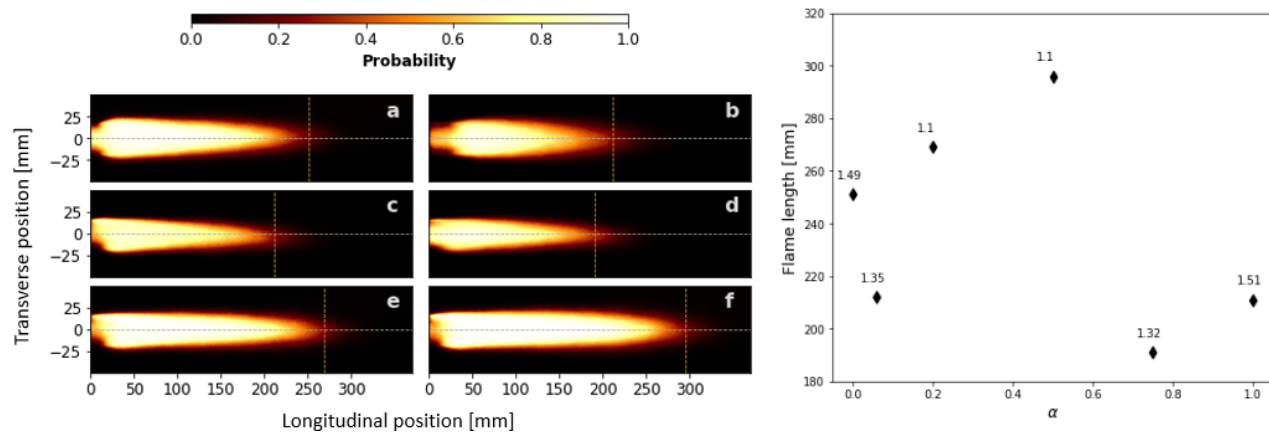


Figure 1 : Pour les cas du brûleur jet latéral, images de la probabilité de présence de flamme (a) $\alpha=0$, $\lambda=1,49$, (b) $\alpha=1$, $\lambda=1,51$, (c) $\alpha=0,06$, $\lambda=1,35$, (d) $\alpha=0,75$, $\lambda=1,32$, (e) $\alpha=0,20$, $\lambda=1,10$, (f) $\alpha=0,50$, $\lambda=1,10$ et graphique des longueurs moyennes de flamme (les valeurs indiquent le taux d'aération)

Cette campagne d'essais a permis de valider le fonctionnement des différents brûleurs avec les différents mix et de mettre en place la méthodologie d'analyse des images de chimiluminescence.

3.1.2. Campagne d'essai au laboratoire CORIA - brûleur TopJet 80

Suite à la campagne d'essais sur le site CLEIA-JETFLAM de Belfort, le brûleur TopJet 80 a été retenu et installé sur un banc expérimental au CORIA. Les flammes générées par ce brûleur sont étudiées pour une gamme de taux d'aération et pour différentes compositions de gaz, depuis le GN seul jusqu'au H_2 pur en passant par différentes compositions de mélanges CH_4-H_2 . Des débitmètres thermiques massiques permettent de contrôler et fixer la puissance thermique à 25 kW, de faire varier indépendamment le taux d'aération λ et le paramètre α , taux volumique de H_2 dans le mélange. Un facteur d'air nominal ($\lambda=1,2$) et un facteur d'air élevé ($\lambda=2$) sont considérés.

Une large base de données expérimentales a été collectée pour ce brûleur. La matrice globale des essais est présentée dans le tableau 1, elle comprend :

- des images intégrées de la zone de réaction par chimiluminescence OH^*
- des images dans le plan médian du brûleur de la zone de réaction par PLIF OH
- des mesures de températures par thermocouple à fil fins dans la flamme
- des images qualitatives du flux rayonné par camera Infra Rouge
- des champs de vitesses non réactifs et des champs de vitesses en conditions réactives à haute cadence
- le couplage des images des zones réactives et des champs de vitesse

P (kW)	λ	α	Imagerie OH^*	Thermométrie TC	PIV-PLIF
25	1,2	0	✓	✓	✓
		0,06	✓		
		0,2	✓		
		0,5	✓		
		0,75	✓		
		0,9	✓		
		1	✓	✓	✓
	2,0	0	✓	✓	✓
		0,06	✓		
		0,2	✓		
		0,5	✓		
		0,75	✓		
		0,9	✓		
		1	✓	✓	✓

Tableau 1 : Conditions opératoires pour les essais réalisés au CORIA sur le brûleur B4 à 25kW.

Ces résultats ont déjà permis d'analyser l'évolution des zones réactives en aval du brûleur TopJet, en termes de topologie et d'intensité moyenne et fluctuantes. La probabilité de présence de flamme a été analysée ainsi que la longueur de flamme pour une large plage de taux d'aération et d'hydrogène. Les mesures de température et l'imagerie IR permet de caractériser le dégagement de chaleur dans la zone réactive en lien avec l'imagerie de chimiluminescence OH^* (Figure 2). Enfin, l'étude de champ aérodynamique par PIV montre que la combustion interne dans le brûleur influence fortement l'aérodynamique en sortie et les résultats obtenus permettent de comprendre la localisation et la topologie des zones réactions obtenues par PLIF- OH . Les mesures réalisées pour $\alpha=1$ sont présentées Figure 3.

Les résultats montrent que pour un faible λ , il reste une fraction de combustible qui n'a pas totalement réagit à l'intérieur du brûleur, la zone de réaction se positionne en sortie de brûleur sur les couches de mélange extérieures de faible vitesse. Pour un fort λ , la réaction se déroule majoritairement à l'intérieur du brûleur. La longueur de flamme diminue progressivement avec l'augmentation du taux d'aération et cette tendance est conservée pour différentes valeurs de α . La longueur de flamme est fortement dépendante de taux d'aération avec peu de variation en fonction du taux d'hydrogène α .

Deux régimes de flammes sont observés avec un seuil correspondant à $\alpha=0,75$. Pour des valeurs inférieures, les flammes sont très semblables aux flammes de méthane, l'intensité et la topologie de la flamme évoluent très peu. Pour $\alpha > 0,75$, les flammes sont

majoritairement de flammes hydrogénées et l'intensité, la probabilité de présence et les longueurs de flamme sont fortement modifiées. On peut remarquer que cette valeur seuil correspond au mélange $\text{CH}_4\text{-H}_2$ pour lequel chaque combustible contribue à part égale à la chaleur produite. On passe donc de flammes de méthane dopées à l'hydrogène à des flammes avec des propriétés propres à l'hydrogène.

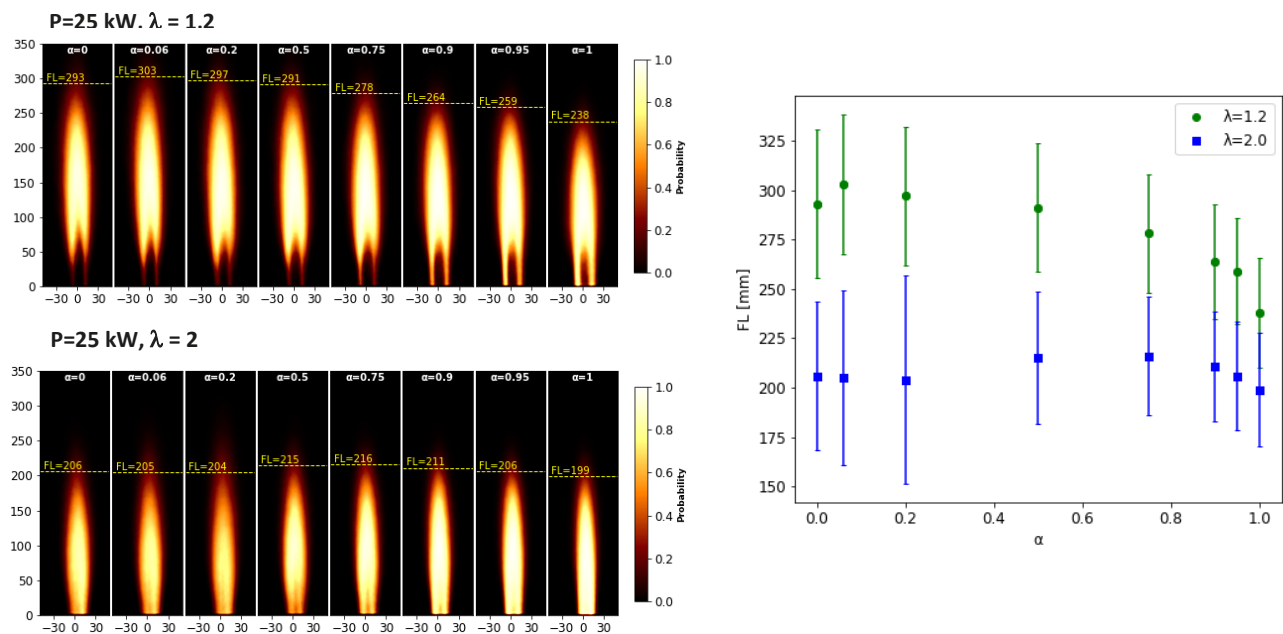


Figure 2 : Pour les cas du brûleur Topjet 80, images de la probabilité de présence de flamme en fonction du α pour $\lambda=1,2$ et $\lambda=2$ et graphique des longueurs moyennes de flamme en fonction de α

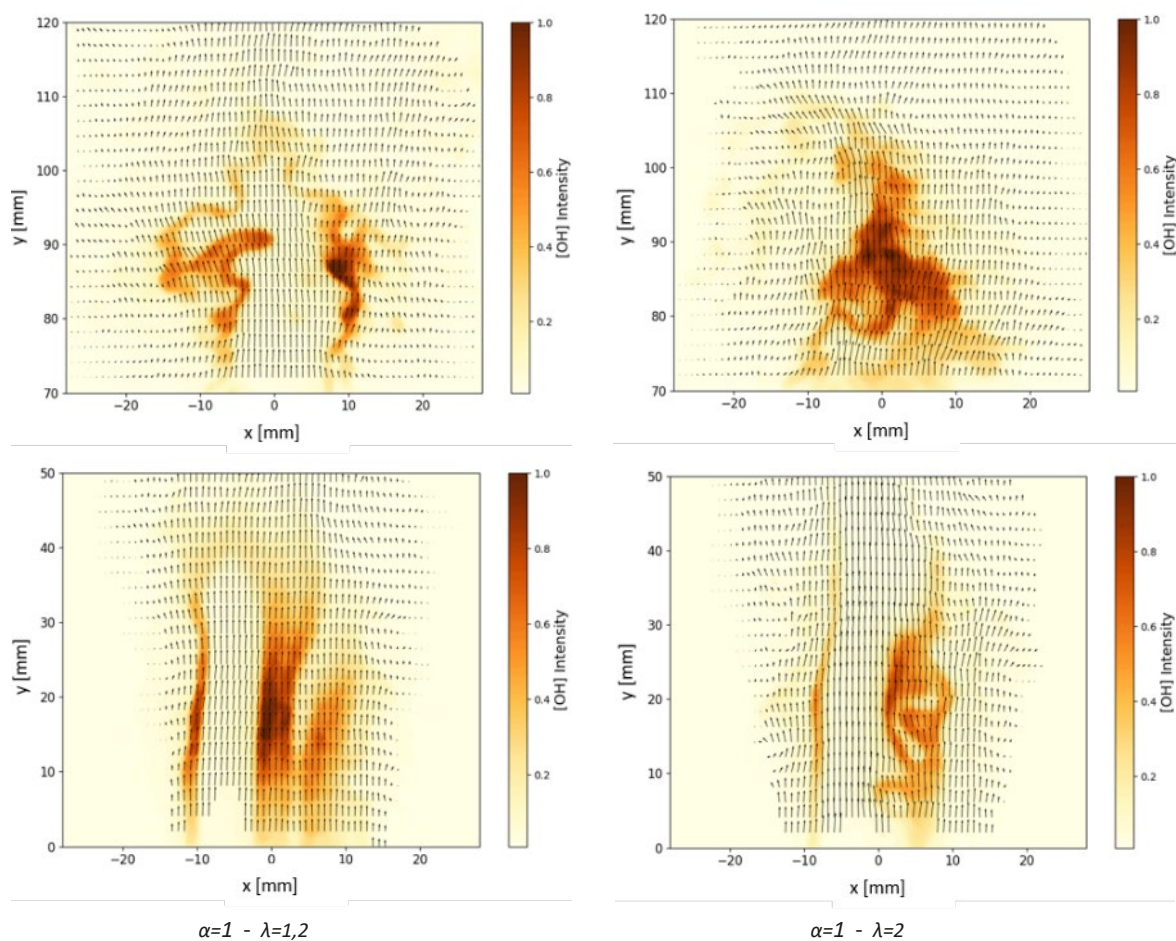


Figure 31 : Champ de Vitesse instantané et signal PLIF OH superposés - $\alpha=1$

3.2. Campagne de cuissons de produits industriels

Pour réaliser des cuissons avec les différents mix sur des produits, le four 4C de CLEIA a été utilisé (Figure 4). Avant de réaliser la campagne d'essai, il a fallu : adapter les brûleurs, mettre au point des mélangeurs adaptés aux modes de fonctionnement des brûleurs et créer un réseau hydrogène en parallèle du réseau de gaz naturel et enfin s'approvisionner en hydrogène en grande quantité.

3.2.1. Description de la cellule d'essai

Le four comprend :

- 3 zones de brûleurs (une zone de brûleur jet grande puissance pour produire le flux latéral, une zone en amont de la charge avec 2 brûleurs jets latéraux pour la montée en température jusqu'à 750°C, 2 rampes de 2 brûleurs fleuret de chaque côté de la charge pour la combustion au palier).
- Des diffuseurs en nid d'abeille simulant la perturbation aérodynamique par les produits en amont et en aval.
- Un système d'injection à débit d'air variable simulant l'injection d'air frais ou d'air réchauffé dans le four.
- Différents capteurs et actionneurs permettant d'assurer les régulations de l'installation.

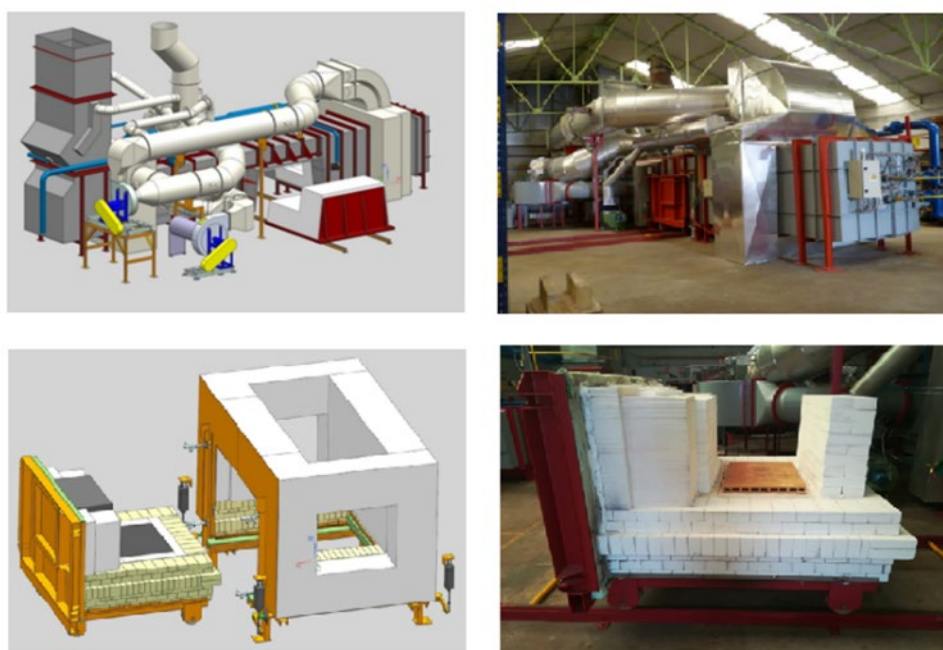


Figure 4 : Vues 3D et photos du four et de la sole mobile et laboratoire de cuisson

Ce four permet de reproduire à l'échelle semi-industrielle des cycles de cuisson dans des conditions proches de celles d'un four tunnel industriel.

3.2.2. Adaptation et modification des brûleurs pour la combustion d'hydrogène

La campagne d'essais sur les brûleurs à l'air libre a également permis l'adaptation des brûleurs pour l'usage des mix. Il a fallu :

- Revoir la circulation du combustible dans chaque brûleur et adapter les volumes pour retrouver des vitesses d'écoulement du gaz compatibles avec l' H_2 .
- Répartir les arrivées du gaz pour que la flamme garde la même dynamique en H_2 qu'en CH_4 (problématique de la vitesse d'inflammation et température de flamme de l' H_2).
- Garder les qualités des brûleurs hautes vitesses à flammes turbulentes obtenues au CH_4 (vitesse allant jusqu'à 230 m/s) qui servent à apporter un brassage autour des produits dans les fours industriels.

3.2.3. Adaptation du four

L'hydrogène a été approvisionné par camions trailers, chaque camion contenant environ 300 kg. Il a fallu adapter le site pour accueillir le camion et permettre les rotations en toute sécurité, déclarer le site en ICPE pour le stockage de plus de 100 Kg d'hydrogène et mettre en place les systèmes de sécurité adaptés à cette zone ATEX. Un poste de détente sécurisé de 200 à 3 bars a été installé à l'extérieur du bâtiment. L'intérieur du bâtiment a également dû être modifié pour être ATEX (ventilation, extincteurs adaptés, détecteurs de fuites, etc.).

La distribution de l'hydrogène vers le four est assurée par des canalisations de gaz dédiées en inox à moyenne pression (3 bars), jusqu'aux zones brûleurs où il est livré en aval du poste de détente à 300 mbar.

En amont de chaque zone de brûleurs, des mélangeurs de combustibles en ligne adaptable à plusieurs mélanges et plusieurs types de brûleurs ont été conçus.

3.2.4. Réalisation des cuissons

Les essais de cuisson, au total 20 essais correspondant aux différents produits et différentes teneurs volumiques en hydrogène, ont été réalisés selon un planning sur 7 semaines.

Pour l'étude, des produits apparents de type tuiles et plaquettes ont été retenus. En effet ces produits sont souvent recouverts d'un engobe de couleur sensible aux atmosphères de cuisson. La taille des tuiles limitant le nombre de produits à tester dans le volume du four, le choix a également été fait de tester certains mélanges à tuiles sous forme de plaquettes.

7 références réparties en trois charges différentes ont été testées : une première charge cuite à 1050°C avec une référence de tuiles pour laquelle les cuissons ont été doublées pour avoir un nombre de produits suffisant pour les essais, une seconde charge cuite à 1050°C avec deux références de plaquettes réalisées avec des mélanges de tuiles extrudés sous forme de plaquettes et une référence de plaquettes et une troisième charge avec 3 références de mélanges de tuiles extrudés sous forme de plaquettes. Pour chaque référence, 2 à 3 sortes d'états de surface ont été cuits : des produits sans revêtement (bruts) et des produits avec une ou deux natures d'engobe coloré (rouge, noir, jaune ou blanc).

Les différents essais ont été monitorés à l'aide de thermocouples pour vérifier le profil de cuisson, d'anneaux de Buller indiquant un état de cuisson pour cartographier les échanges dans la charge et d'un analyseur de fumées pour mesurer les teneurs en CO₂, O₂ et NOx des fumées et obtenir par calcul la teneur en H₂O.

3.2.5. Résultats des essais cuisson

3.2.5.1. Comportement des organes de cuisson et profils de cuisson

À la suite des adaptations pour intégrer un réseau hydrogène et réaliser les différents mix GN/H₂, tous les essais ont pu être réalisés avec quelques aléas constatés et résolus en temps réels ou observés après l'essai.

Les principaux constats ont été :

- Un impact important du flux transversal sur la stabilité des flammes à 100 % d'H₂, nécessitant l'augmentation du débit d'air et du débit d'H₂ en proportion pour permettre l'atteinte des conditions en température,
- Un phénomène de gonflement des matériaux réfractaires expansés de type perlite pour les cuissons riches en hydrogène certainement lié à la présence plus importante de vapeur d'eau,

Certains de ces aléas ont parfois influencé l'atteinte des consignes en température engendrant des états de cuisson différents d'une cuisson à l'autre.

3.2.5.2. Composition des fumées

Les mesures des compositions des fumées ont montré :

- Une augmentation significative des émissions de NOx pour les combustions fortement hydrogénées (+ 130 à 380 % à 100 % d'H₂ par rapport à des valeurs de référence de l'ordre de 30-50 ppm),
- Une augmentation de la teneur en vapeur d'eau estimée par calcul (+35 à 50 % à 100 % d'H₂ par rapport à des valeurs référence de l'ordre de 6-7 %).

3.2.5.3. Propriétés des produits

Les produits obtenus après cuisson dans la cellule ainsi que des produits cuits en usine ont été testés suivant les essais normatifs liés à leurs propriétés d'usage : caractéristiques dimensionnelles, imperméabilité à l'eau, dilatation à l'humidité, résistance au gel, résistance à la rupture en flexion avant et après gel, colorimétrie.

Malgré les hétérogénéités de cuissons, les résultats des différents essais pour les trois charges montrent que l'intégration d'hydrogène comme combustible n'impacte pas la qualité des produits si les conditions en température sont atteintes.

3.3. Etude technico-économique

En 2021, les 41 des principaux sites ont consommé environ 2 636 GWh_{PCS} de gaz naturel qui ont été la source d'émission de 528 Mt de CO₂. La substitution de la totalité du GN consommé par de l'H₂ nécessiterait une production annuelle d'environ 77 Mt, soit une puissance d'électrolyse d'environ 607 MW. L'industrie des tuiles et briques en France a une répartition diffuse dans le territoire, souvent éloignée des grands pôles industriels et donc des futurs réseaux de transport envisagés pour l'hydrogène. Le développement de réseaux plus locaux se fera en fonction des volontés des territoires et des opportunités de multi-usages. C'est pourquoi, cette étude technico-économique s'est focalisée sur le mode d'approvisionnement le plus probable à moyen long terme pour les industriels, c'est-à-dire la production in situ de l'hydrogène.

Au cours de l'étude, à la suite d'échanges avec différents fournisseurs d'hydrogène renouvelable, une étude de pré faisabilité technico-économique pour un site industriel existant a pu être menée avec un fournisseur et des estimations de coûts de fourniture d'hydrogène pour une substitution partielle ou totale pour un site industriel fictif ayant une consommation annuelle de 100 GWh ont également été réalisées avec deux autres fournisseurs. Pour ces estimations, la technologie de production d'hydrogène renouvelable a été l'électrolyse pour deux d'entre eux et la pyrolyse de biomasse pour le troisième.

Les estimations de coût de fourniture de cet hydrogène renouvelable ou bas carbone varient de 100 à 240 EUR/MWh en fonction des modes de production et des mécanismes et leviers de réductions des coûts envisagés.

Pour la production par électrolyse, les coûts sont très dépendants du coût de l'électricité ENR ou bas carbone utilisée et des leviers actionnés permettant d'abaisser cette part d'OPEX. Pour le cas spécifique de la pyrolyse de biomasse, c'est la disponibilité, le coût et la gestion de la biomasse qui sont stratégiques.

En l'état actuelle des choses, le gap économique pour un industriel est trop important (multiplication par 2 à 3 du coût lié à l'énergie qui représente environ 25% du coût de production). Des aides aux OPEX pourraient faciliter le passage à l'usage d'hydrogène renouvelable.

4. Conclusion / Perspectives du projet

Le projet a permis de répondre à la majorité des objectifs fixés.

L'étude exhaustive de l'évolution du comportement de la flamme en fonction du taux d'intégration d'hydrogène au méthane pour un brûleur de type Top jet a montré deux régimes de flammes en fonction du taux volumétrique d'hydrogène. La transition se fait pour un taux volumétrique de 75 %. Pour des valeurs inférieures à ce taux, les flammes sont très semblables aux flammes de méthane avec une intensité et une topologie qui évoluent très peu. Au-delà de ce taux, les flammes sont majoritairement des flammes hydrogénées et l'intensité, la probabilité de présence et les longueurs de flamme sont fortement modifiées. Cette valeur de transition correspond au mélange CH₄-H₂ pour lequel chaque combustible contribue à part égale à la chaleur produite. On passe donc de flammes de méthane dopées à l'hydrogène à des flammes avec des propriétés propres à l'hydrogène.

Le projet a également montré la faisabilité technique à l'échelle semi industrielle de cuissons avec des mix GN/H₂ jusqu'à une cuisson 100% H₂.

Les mesures réalisées au cours des essais sur les fumées ont montré un impact notable de l'hydrogène sur les émissions en NO_x.

La caractérisation des produits cuits lors des essais n'a pas montré d'impact significatif de la teneur en hydrogène sur leurs propriétés d'usage.

L'analyse technico-économique a montré la pré faisabilité technique pour un site industriel de la fourniture en hydrogène renouvelable ou décarboné par la production in situ à proximité du site. Néanmoins les coûts d'achat de cet hydrogène sont 2 à 3 fois plus importants que les coûts actuels de l'énergie, ce qui, sans aides aux OPEX représentent un frein.

Le projet a permis d'identifier un verrou important à lever qui est la génération importante de NO_x pour les combustions à forte teneur en hydrogène. Pour lever ce verrou, il faut encore travailler sur les brûleurs de type jet afin de réduire ces émissions de NO_x tout en conservant leur spécificité liée à l'importante quantité de mouvement des gaz de combustion qui permet les échanges de chaleur par convection avec les produits à cuire.

RÉSUMÉ

L'industrie des Tuiles et Briques est une industrie de transformation, intensive en énergie, qui émet du CO₂ pour la fabrication de ses produits. Ces émissions proviennent en grande partie (en moyenne autour de 75 %) de l'usage de gaz naturel comme combustible en partie pour le séchage et essentiellement pour la cuisson des produits.

Pour réduire significativement les émissions de CO₂ dans cette industrie, il faut remplacer le gaz naturel par une autre énergie décarbonée.

L'hydrogène qui peut être un vecteur énergétique décarboné et propre pour la combustion n'a pas été testé en terre cuite. Les impacts de son intégration sur la qualité de cuisson et sur la qualité des produits sont peu connus.

Le projet a permis de tester, à l'échelle semi-industrielle les cycles de cuisson de plusieurs produits dans un four cellule, en intégrant au gaz naturel différents taux d'hydrogène (6, 20, 50 et 75 % en volume) ainsi qu'en cuisant avec de l'hydrogène seul et de vérifier : l'impact sur la qualité des produits, sur les brûleurs, les paramètres de combustion et sur les éléments de combustion émis lors de la cuisson (H₂O, NOx).

Les essais ont montré que l'usage d'hydrogène avait très peu d'incidence sur la qualité des produits et que son intégration était techniquement envisageable demandant néanmoins une optimisation des brûleurs vis-à-vis des émissions de NOx.

Le coût de ce vecteur énergétique reste très élevé pour envisager son usage à l'échelle industrielle dans la conjoncture actuelle sans soutien financier local, national ou européen.

Au cours du projet, une étude exhaustive du comportement de la flamme pour un brûleur de type jet a permis de montrer un seuil de changement de comportement de la flamme pour un taux volumique d'incorporation à 75%.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2197D082

Projet de recherche coordonné par : Catherine POIRIER, CTMNC

Appel à projet de recherche : APRED

Coordination technique - ADEME : BUREL Nicolas

Direction/Service : DETI – Service Décarbonation Industrie et Hydrogène

CITATION DE CE RAPPORT

BLANCHARD Léo, HOUIDI Sarra, LEBASLE Olivier, CLEIA, HONORE David, LACOUR Corine, CORIA, POIRIER Catherine, CTMNC. 2024. L'hydrogène pour la cuisson des matériaux de terre cuite – Une voie de décarbonation pour cette industrie nécessitant une cuisson haute température. 10 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://bibrairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.