



HAL
open science

Utilisation de la combustion solide dans les machines thermiques

Pascal Laboureur, Ricardo Lomba, Fabien Halter, Christian Chauveau,
Clément Dumand

► **To cite this version:**

Pascal Laboureur, Ricardo Lomba, Fabien Halter, Christian Chauveau, Clément Dumand. Utilisation de la combustion solide dans les machines thermiques. 9ème édition du Colloque FRancophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique (COFRET'18), Jun 2018, Strasbourg, France. hal-01860128

HAL Id: hal-01860128

<https://hal.science/hal-01860128v1>

Submitted on 23 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COFRET'18

UTILISATION DE LA COMBUSTION SOLIDE DANS LES MACHINES THERMIQUES

LABOUREUR Pascal^{1,2*}, LOMBA Ricardo³, HALTER Fabien², CHAUVEAU Christian²,
DUMAND Clément¹

¹ Groupe PSA, Route de Gisy, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

² ICARE-CNRS, 1C Avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex 2, France

³ AVL LMM SAS, 5-9 rue Benoît Frachon, 91127 Palaiseau Cedex, France

* Auteur correspondant : pascal.laboureur@mps.com

Résumé

Les problèmes tels que le changement climatique et le réchauffement planétaire sont liées à la consommation des carburants fossiles. Malgré des systèmes de conversion d'énergie propre déjà existants, notre incapacité actuelle à stocker massivement cette énergie est le principal obstacle au développement de ces solutions alternatives aux combustibles fossiles.

Pour répondre à ce défi, une solution consiste à développer un nouveau vecteur énergétique basé sur des poudres métalliques. En effet, la combustion métallique est fortement exothermique et les oxydes formés par cette réaction peuvent être recyclés par des procédés alimentés avec de l'énergie renouvelable. Ce vecteur énergétique fonctionnerait ainsi en boucle fermée et sans générer de gaz à effet de serre sur l'ensemble de son cycle.

En revanche, les propriétés fondamentales et les structures de ces flammes hétérogènes métalliques sont encore méconnues, avec des écarts constatés dans la littérature. Dans ce contexte, un brûleur de type Bunsen capable de stabiliser une flamme Aluminium/Air a été développé et permet ainsi la caractérisation de ces flammes à l'aide de différents diagnostics optiques. Les estimations de la vitesse et de la température de flamme obtenues démontrent la possibilité d'exploiter le potentiel énergétique des poudres d'aluminium, constituant ainsi une alternative crédible aux combustibles fossiles grâce à ses propriétés de combustion et sa grande disponibilité sur terre.

Mots-clés : Brûleur type Bunsen, Combustibles métalliques, Nouveau vecteur énergétique

Introduction

Les tendances actuelles et les prévisions futures démontrent que notre civilisation est piégée dans une dépendance énergétique grandissante. Avec une population mondiale en constante augmentation et le développement important des pays non membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) ces 25 dernières années, la consommation énergétique mondiale ne cesse de croître inexorablement. Par ailleurs, seulement 12,4% de cette énergie consommée était fournie par des sources renouvelables en 2015 [1].

En plus des réserves de produits carbonés fossiles qui s'épuisent progressivement, l'utilisation de l'énergie constitue de loin la plus grande source d'émission de gaz à effet de serre sur la planète, représentant ainsi 68% des émissions globales de gaz à effet de serre anthropogéniques en 2014. Les émissions dues à l'usage de l'énergie sont alors composées respectivement à 90% de CO₂, 9% de CH₄ et 1% de N₂O [2]. La Figure 1 illustre l'évolution

temporelle des émissions de CO₂ issues de l'utilisation de l'énergie produite par la combustion de combustibles fossiles.

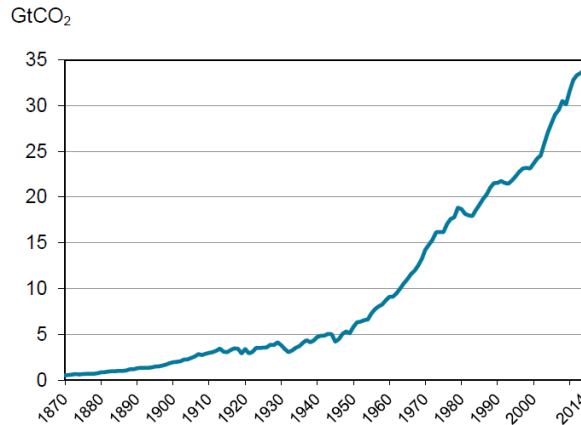


Figure 1: Emissions de CO₂ issues de la combustion de combustibles fossiles [2]

La communauté scientifique s'accorde à dire que l'activité humaine est en partie responsable du changement climatique et du réchauffement planétaire. Au cours de ces 30 dernières années, les anomalies de température sont de plus en plus marquées. En 2015, une augmentation de 0,87°C de la surface globale planétaire a été constatée par rapport à la température moyenne observée entre 1951 et 1980 [3]. L'élévation de la température globale terrestre entraîne notamment une fonte progressive de la banquise Arctique et une réduction de la glace pérenne. Ces événements ont pour conséquence d'augmenter le niveau des océans d'environ 3,2 mm par an depuis plus de 15 ans, menaçant ainsi la biodiversité et l'implantation de certaines populations [4].

Bien que des solutions alternatives aux produits carbonés existent pour la conversion d'énergie propre comme les panneaux photovoltaïques ou les éoliennes, celles-ci présentent toutes une utilisation limitée découlant principalement de notre incapacité à stocker massivement l'énergie produite. Palier au stockage énergétique pour remédier aux différents problèmes est indispensable et nécessite le développement d'un nouveau vecteur énergétique.

1 – Le vecteur énergétique métallique

Les propriétés énergétiques des particules solides métalliques sont déjà connues, et utilisées dans la propulsion spatiale ou militaire, afin d'augmenter la densité énergétique des propergols solides. Le concept du vecteur énergétique métallique est donc simple, il consiste à utiliser directement les poudres métalliques comme moyen pour véhiculer l'énergie. La philosophie de ce vecteur novateur est présentée sur la Figure 2.

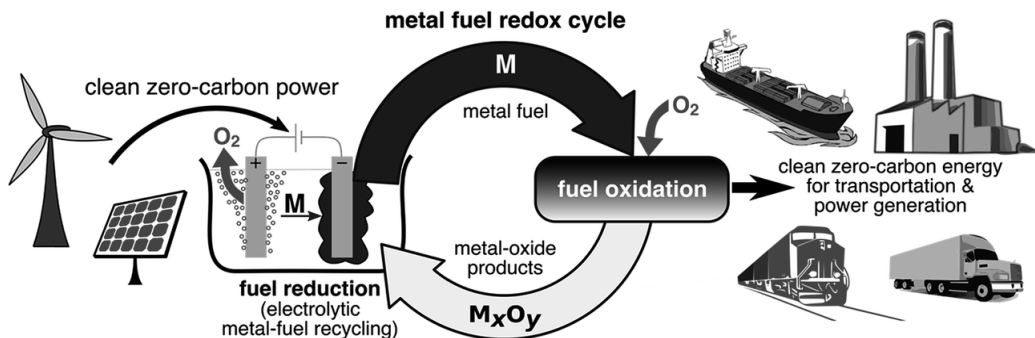


Figure 2: Représentation schématique du concept de vecteur énergétique métallique [5]

L'utilisation de ce vecteur énergétique nécessite de travailler sur 2 grands axes principaux : le stockage de l'énergie et la restitution de celle-ci. Dans un premier temps, le stockage de l'énergie s'effectue via une réduction des oxydes métalliques afin de former du métal pur en libérant l'oxygène. Pour rester cohérent sur le principe global de ce vecteur énergétique, le processus de traitement des particules oxydées, comme l'électrolyse, ne doit pas générer de gaz à effet de serre et l'énergie primaire utilisée doit nécessairement provenir d'énergies vertes. Grâce à la formation d'une fine couche d'oxydation passive naturelle autour des particules métalliques ainsi créées, l'énergie accumulée lors du processus de réduction reste donc conservée dans le temps et peut être facilement transportée. Pour permettre la restitution de cette énergie, l'oxydation complète des particules métalliques avec le dioxygène présent dans l'air environnant est mis en œuvre, formant ainsi des oxydes métalliques. De manière à ne pas polluer l'environnement et pouvoir réitérer ce cycle, les particules oxydées sont donc captées et renouvelées via le processus de conversion en métal pur.

Le but est donc de participer au développement de ce nouveau vecteur énergétique métalliques afin qu'il soit durable, viable, renouvelable et propre, c'est-à-dire sans création de déchets ni d'émissions de gaz à effet de serre.

2 – Concept de convertisseur énergétique à poudres métalliques

Concernant plus particulièrement l'étude de la restitution de l'énergie, la Figure 3 présente un système théorique complet permettant de récupérer l'énergie accumulée dans les particules métalliques. La première partie est constituée d'un réservoir à poudres métalliques qui permet d'injecter ces particules à travers un brûleur afin de générer une flamme Métal/Air. Ce brûleur est confiné et raccordé à un cyclone pour filtrer les fumées produites et permettre de recycler les particules oxydées. Les gaz brûlés sont ensuite dirigés dans une machine thermique (turbine, moteur Stirling, etc.) pour transformer l'enthalpie sensible contenue dans les gaz chauds en travail et/ou chaleur. Le système pourrait donc être aussi bien utilisé pour le chauffage que pour la production d'électricité en reliant le convertisseur à une génératrice.

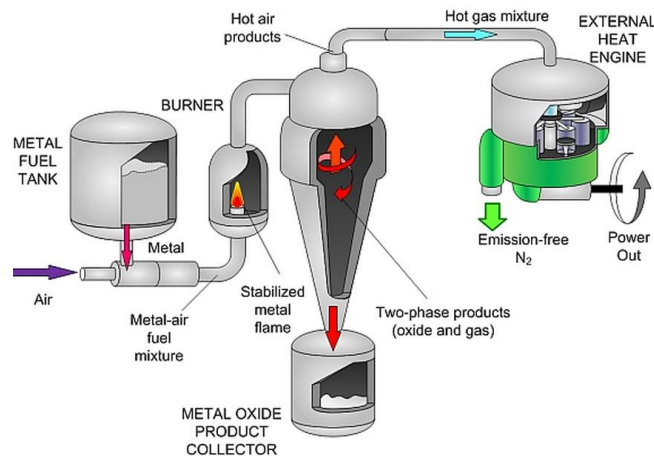


Figure 3: Illustration théorique d'un convertisseur énergétique complet à poudres métalliques [6]

3 – Dispositif expérimental

Afin de contribuer à l'aboutissement du système présenté ci-dessus, une étude sur la combustion des particules solides métalliques est nécessaire et implique la mise en place d'un banc d'essai illustré par la Figure 4. Avec un bon potentiel énergétique (31,1 MJ/kg), des procédés de régénération des oxydes (Al_2O_3) par électrolyse et une combustion possible de

particules micrométriques, le choix de poudre d'aluminium de faible diamètre (7 μm) a été retenu. Le dispositif expérimental est constitué d'un générateur d'aérosol PALAS BEG 1000 possédant un réservoir. Une buse d'injection venturi, placée à la base du brûleur, est contrôlée via l'entrée verticale grâce à des débitmètres régulateurs d'air et de CH_4 . Ce flux injecté permet de générer une dépression dans l'entrée radiale afin de créer un écoulement d'aspiration d'air atmosphérique chargé de particules métalliques provenant du PALAS. Une flamme pilote annulaire CH_4/Air est utilisée à la sortie du brûleur, pour compenser les pertes thermiques avec la tête du brûleur refroidie par eau et ainsi limiter les instabilités à la base de la flamme principale. Au démarrage, une flamme prémélangée de CH_4/Air est stabilisée sur le brûleur, puis l'ajout progressif de particules métalliques amène à obtenir une flamme hybride Aluminium/ CH_4/Air . Enfin, l'alimentation en CH_4 est interrompue pour permettre ainsi l'observation d'une flamme stabilisée Aluminium/Air avec une richesse maîtrisée.

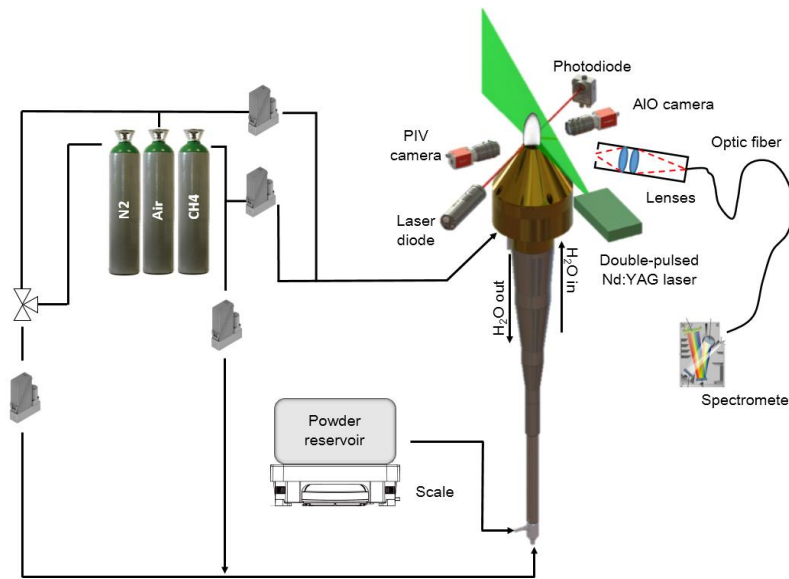


Figure 4: Schématisation du dispositif expérimental et des instruments de mesure mis en place [7]

4 – Résultats et discussions

Différents moyens de mesures ont été couplés au dispositif expérimental. Le débit massique délivré par le générateur d'aérosol et celui de l'encrassement dans le brûleur ont été obtenus avec une balance à enregistrement numérique, permettant ainsi de calculer le débit massique en particules métalliques à la sortie du brûleur. Parallèlement, une mesure de la concentration a été obtenue par une technique d'absorption laser. Corréliées aux informations de débit, les variations lumineuses mesurées sur une photodiode renseignent alors sur la concentration des particules d'aluminium en sortie brûleur. La caractérisation de l'écoulement a été faite par des mesures de vélocimétrie par images de particules (PIV), où les particules métalliques et oxydées servent de traceurs de par un nombre de Stokes particulière faible. La conception du dispositif assure un profil de vitesse plat de l'écoulement en sortie du brûleur et une bonne homogénéité spatiale de la concentration en particules, permettant ainsi de générer une flamme laminaire stable avec un étirement faible pour un débit total d'air de 53 l/min.

La vitesse de flamme (S_L) est une donnée fondamentale qui permet de caractériser la réactivité d'un mélange Carburant/Comburant. Elle est définie comme la vitesse à laquelle les gaz frais sont consommés suivant la direction normal à la surface de la flamme. Par conservation de la masse, la vitesse de flamme est définie comme le rapport entre le débit volumique total des gaz frais et la surface de flamme. Puisque le brûleur à particules est un

montage axisymétrique, la surface de flamme peut être reconstruite en intégrant le contour de flamme obtenu dans un plan contenant l'axe de symétrie.

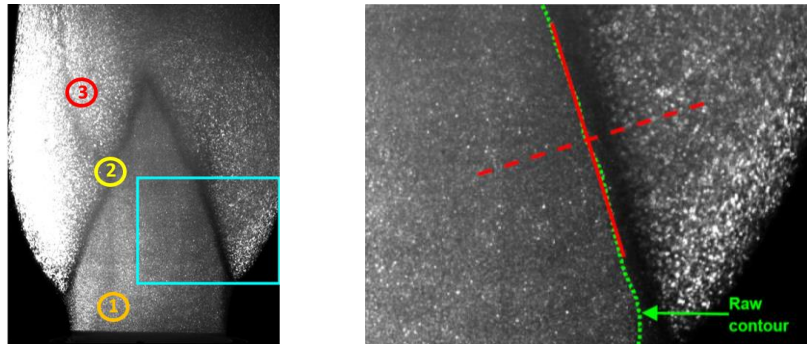


Figure 5: Image de tomographie d'une flamme Aluminium/Air avec le traçage du contour de flamme

La Figure 5 présente une image obtenue par tomographie laser. Une caméra rapide CCD, munie d'un filtre passe-bande centré à 532 nm avec une largeur à mi-hauteur de 2 nm, observe la diffusion de Mie émise par les particules solides illuminées par un plan laser passant au milieu du brûleur. La première zone lumineuse (1) se réfère aux gaz frais contenant les particules d'aluminium à la sortie du brûleur. Ensuite, la zone sombre conique constatée (2) représente approximativement la zone de réaction de la flamme. Pour finir, la zone lumineuse (3) correspond au panache généré par les gaz brûlés contenant les particules oxydées. Par exemple, en s'intéressant à la zone de réaction au niveau du rectangle bleu, un contour peut être établi par traitement d'images entre la zone des gaz frais (1) et de la zone sombre (2). Ainsi, une normale à ce contour est créée et, grâce aux mesures PIV, un profil de vitesse est obtenu suivant cette direction. La vitesse de flamme correspond donc simplement au minimum de vitesse sur ce profil. La Figure 6 représente les différentes vitesses de flamme laminaire ainsi obtenues, avec une moyenne de 34 cm/s.

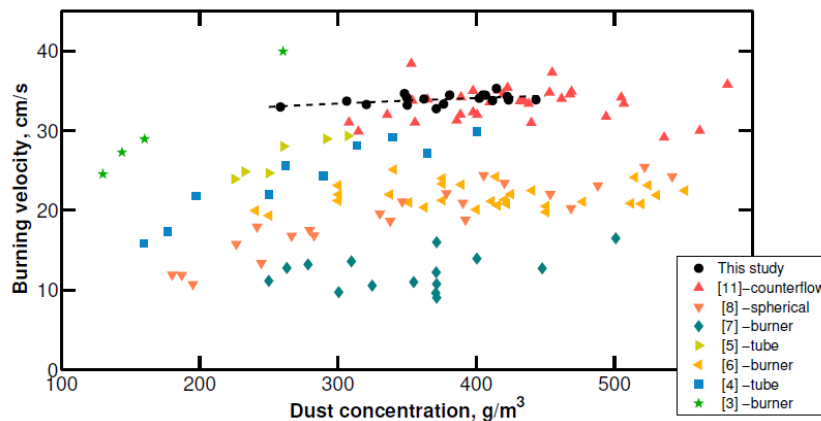


Figure 6: Comparaison des vitesses de flamme pour des richesses d'aluminium entre 0.8 à 1.5

De par la granulométrie de la poudre utilisée, l' $\text{AlO}(\text{g})$ est un composé intermédiaire de réaction instable lors de la combustion de particules d'aluminium. Grâce à la spectroscopie optique d'émission, les températures de cette phase gazeuse dans la flamme ont été déterminées. Le spectre d'émission de la flamme est mesuré, puis corrigé par une calibration, afin d'obtenir le spectre réel. Celui-ci est alors composé d'une émission du fond continue due à l'agitation thermique des produits de combustion condensés et d'une émission provenant des transitions rotationnelles-vibrationnelles des niveaux électroniques des espèces gazeuses formées. Le spectre d'émission de la phase condensé est soustrait au spectre réel pour obtenir le spectre expérimental, représentant principalement l'émission de l' $\text{AlO}(\text{g})$. La Figure 7

présente la comparaison entre le spectre expérimental adimensionné et un spectre synthétique de l'AIO(g), pour une température de 3152 K. La température de la phase gazeuse est ainsi obtenue pour un critère de convergence fixé. Ainsi, la température moyenne de la flamme est de 3146 K, soit 400 K en dessous de la température adiabatique de flamme aluminium/air.

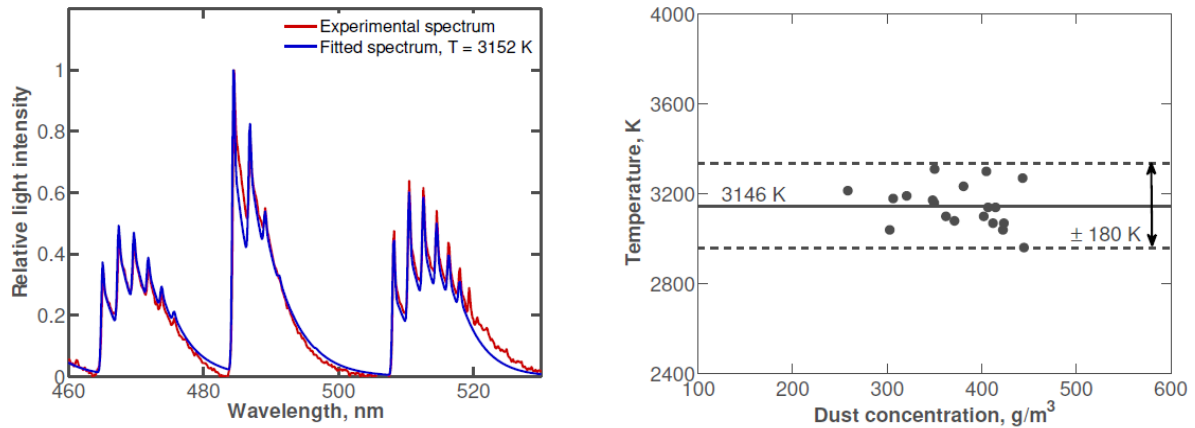


Figure 7: Comparaison des spectres AIO expérimental et simulé ainsi que les températures de flamme pour des richesses d'aluminium entre 0,8 et 1,5 [7]

Conclusions

Le dispositif expérimental présenté est capable de stabiliser des flammes laminaires d'aluminium avec de l'air comme comburant. Il est possible d'extraire des mesures fiables de la vitesse de combustion en utilisant la détection instantanée des contours de flamme grâce à la tomographie laser à haute cadence et de la température de flamme grâce à la spectrométrie.

Les résultats montrent que la vitesse et la température de flamme ne varient que très légèrement sur une plage de richesse allant de 0,8 à 1,5. Ces propriétés représentent un véritable atout pour la stabilisation d'une flamme puisque celle-ci sera peu dépendante des variations éventuelles de mélanges injectés, contrairement aux flammes d'hydrocarbures traditionnels. De plus, il est intéressant de noter que ce brûleur a une puissance estimée à 10 kW et comparable aux systèmes Range-Extender. Ayant des caractéristiques énergétiques similaires aux carburants hydrocarbonés classiques, l'aluminium peut donc être considéré comme un candidat potentiel pour une application future du vecteur énergétique métallique.

Références

- [1] IEA, "International Energy Outlook 2017", Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, 2017
- [2] IEA, "CO₂ emissions from fuel combustion 2017", Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, 2017
- [3] J. Hansen, M. Sato, "Global temperature in 2015", GISS, NASA, NY. URL: <http://data.giss.nasa.gov>, 2016
- [4] Church, A. John, J. Neil, "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century", *Surveys in geophysics*, vol. 32, no 4-5, p. 585-602, 2011
- [5] P. Julien, J. Bergthorson, "Enabling the metal fuel economy: green recycling of metal fuels", *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 1, no 3, p. 615-625, 2017
- [6] J. Bergthorson, S. Goroshin, M. Soo, "Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power", *Applied Energy*, vol. 160, p. 368-382, 2015
- [7] R. Lomba, "Utilisation de la combustion métallique dans les machines thermiques", Thèse de doctorant, Université d'Orléans, URL : <http://www.theses.fr/2016ORLE2080>, 2016