



**HAL**  
open science

## Etude d'un électro-brûleur industriel doté d'une torche à arc triphasée pour la valorisation énergétique de combustibles à faible pouvoir calorifique

Sabri Takali, Laurent Fulcheri, François Cauneau, Vandad-Julien Rohani

### ► To cite this version:

Sabri Takali, Laurent Fulcheri, François Cauneau, Vandad-Julien Rohani. Etude d'un électro-brûleur industriel doté d'une torche à arc triphasée pour la valorisation énergétique de combustibles à faible pouvoir calorifique. CAE XI - Colloque sur les Arcs Electriques, Mar 2013, Toulouse, France. 4 p. hal-00804644

**HAL Id: hal-00804644**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00804644>**

Submitted on 28 Mar 2013

**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.

# Etude d'un électro-brûleur industriel doté d'une torche à arc triphasée pour la valorisation énergétique de combustibles à faible pouvoir calorifique

Takali Sabri, Laurent Fulcheri, François Cauneau, Vandad Rohani

*MINES ParisTech, Centre PERSÉE*

*Procédés, Énergies renouvelables et Systèmes énergétiques*

*Rue Claude Daunesse, CS 10207, 06904 Sophia Antipolis ☐France, Phone*

*+33.493.957.540. E-mail [sabri.takali@mines-paristech.fr](mailto:sabri.takali@mines-paristech.fr).*

Dans le contexte actuel d'épuisement des ressources énergétiques fossiles conventionnelles et du réchauffement climatique, la production d'énergie à partir de combustibles renouvelables (biomasse et déchets) présente un intérêt croissant. Cependant les procédés conventionnels de brûleurs industriels sont mal ou pas adaptés à la valorisation énergétique des combustibles pauvres (pouvoir calorifique < 10MJ/kg) qui sont pourtant peu onéreux et largement disponibles. Pour résoudre ce problème, trois solutions se présentent : la co-combustion intensifiée avec appoint de combustible fossile riche, l'oxy-combustion, et la combustion assistée par plasma. L'étude d'un électro-brûleur doté d'une torche à arc triphasé (TAT) et fonctionnant avec des combustibles pauvres s'inscrit dans cette perspective et a pour objectif de répondre à ces besoins en termes de réduction des coûts (CAPEX et OPEX), équilibre du bilan carbone et limitation des rejets de polluants. Dans ce contexte, des travaux menés dans le cadre d'une thèse de Doctorat ont démarré en octobre 2012 au laboratoire PERSEE de MINES ParisTech. Ces travaux sont conduits en parallèle sur les plans théorique et expérimental. Sur un plan théorique les travaux portent sur l'analyse des phénomènes physico-chimiques mis en jeu (érosion des électrodes, comportement des arcs, combustion, ...). Sur un plan expérimental, les travaux portent sur la conception, le développement et la mise au point d'un électro brûleur de laboratoire pour l'étude de la combustion assistée par plasma de combustibles pauvres renouvelables. L'objectif global de la thèse étant la démonstration de la faisabilité et de l'intérêt technico-économique et le dimensionnement d'un électro brûleur de taille industrielle. Dans cet article sont présentés le contexte de cette étude, la démarche envisagée et les premiers résultats obtenus.

## Contexte

Le secteur de la production d'énergie en union européenne est responsable de la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre [1]. Partant du fait que les rejets de CO<sub>2</sub> ont augmenté de 56 % entre 1960 et 1995 dans l'union européenne [2], de 17% entre 1995 et 2010 et continueront de monter de 0.64% par ans jusqu'à 2020 et sachant que les pays européens ont fixé comme objectif de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 8% par rapport au niveau de 1990 selon le protocole de Kyoto [2], un besoin socio-économique urgent pousse les fournisseurs d'énergie à s'investir dans des solutions énergétiques moins polluantes.

De plus, depuis la fin des années 90, l'industrie énergétique a été confrontée à une hausse continue et croissante des prix des énergies fossiles. En effet, le prix du baril de

pétrole a été multiplié par 4 à partir des années 1999. Le charbon et le gaz, en déficit d'offre, ont également connu des chocs similaires sur la même période. Comme la part de ces combustibles fossiles dans la consommation mondiale dépassent 80% [3], l'impacte de leurs augmentations de prix n'a pas pu être atténué par les gains importants en termes de performances énergétique sur le plan technologique et les prix d'électricité ont fini par suivre cette augmentation.

D'autre part, des combustibles à faibles pouvoirs calorifiques comme les boues des stations d'épuration (PCI=16 MJ/kg [4]) ou les déchets municipaux solides (PCI=5~10 MJ/kg [5]) sont produites à de très grandes quantités sans pour autant être valorisés énergétiquement. A titre d'exemple, en France, 11 000 stations d'épuration assurent le traitement des eaux urbaines et produisent 2 millions de tonnes de boues par an (en matière sèche) [4]. En absence de procédés industriels capables de valoriser énergétiquement ces déchets, on peut considérer qu'un substitut de 5% des combustibles fossiles riches consommés en France pour la production d'électricité est gaspillé.

D'ailleurs, la majorité des brûleurs industriels sont dotés de technologies mal ou pas adaptées à la valorisation énergétique des combustibles pauvres. Le problème est rencontré au niveau de l'allumage, le maintien de la combustion et la stabilité de la flamme. En effet, la composition des combustibles pauvres est très variée et contient un faible pourcentage de matières organiques volatiles. A titre d'exemple, les boues d'épuration ne contiennent que 45% de matière organique volatile tandis qu'un échantillon de biomasse en contient plus de 80% [6]. La solution la plus courante consiste à utiliser des combustibles riches (fuel ou gaz naturel) pour fournir l'apport énergétique nécessaire à la combustion de ces combustibles pauvres et assurer le maintien et la stabilité de la flamme en condition thermique dégradée. La co-combustion intensifiée avec appoint de carburant fossile riche ne représente pas une solution pratique et rentable pour la valorisation des combustibles pauvre et le rééquilibrage du bilan carbone car en plus des contraintes de prix et de pollution des combustibles fossiles, l'utilisation simultanée de deux combustibles implique une complexification technologique au niveau du stockage, alimentation, injection et contrôle.

Une deuxième solution actuellement en cours de développement consiste à utiliser le procédé d'oxy-combustion pour une meilleure valorisation des combustibles à faible PCI. Cette technologie offre l'avantage de produire des gaz d'échappement à haute concentration en CO<sub>2</sub> ce qui facilite énormément son stockage et son traitement. Cependant, toutes les méthodes utilisées actuellement pour produire de l'oxygène nécessitent des procédés énergivores ce qui pénalise lourdement le rendement global de l'oxy-combustion et le baisse de 10% par rapport à un procédé classique de combustion [6].

Les deux solutions précédentes souffrent donc d'un certain nombre de limites qui pourraient être dépassées par la voie d'assistance par plasma de la combustion. Cette technologie est installée actuellement dans toutes les nouvelles centrales thermiques à charbon en Chine et montre une efficacité satisfaisante [7]. Son principe repose sur l'activation thermo-chimique de la combustion. En effet, au niveau chimique, le plasma permet d'accélérer les cinétiques de réactions de combustion en améliorant la production de radicaux et d'espèces ionisés hautement réactifs. Au niveau thermique,

L'enthalpie délivrée par un plasma thermique permet de s'affranchir des limites basses d'inflammabilité et de fournir l'énergie d'activation nécessaire pour la combustion.

La plupart des technologies plasma actuelles sont basées sur des torches à courant continu qui souffrent de problèmes de fiabilité lorsqu'elles fonctionnent à l'air. Une technologie plasma triphasée originale a été développée au CEP dans le cadre de recherches antérieures. Cette technologie devrait permettre de repousser certaines limites des technologies à courant continu. Ce système est la base des travaux de thèse en cours ayant pour but de développer un électro-bruleur industriel permettant la valorisation des combustibles à faible pouvoir calorifique.

## Démarche

L'objectif final de ces travaux consiste à concevoir un bruleur de taille industrielle d'une puissance de l'ordre de 1MW thermique. Pour ce fait, un bruleur de laboratoire est actuellement développé et sera optimisé pour identifier et résoudre les problématiques liées à la combustion de matières premières à faible PCI.

Afin de profiter du pouvoir ionisant du plasma et du caractère fortement réactif de l'oxygène atomique, il est plus judicieux de faire fonctionner la torche en milieu oxydant. Ce mode de fonctionnement implique une forte érosion des électrodes en graphite. D'où la première étape qui consiste à minimiser l'érosion des électrodes et de rendre le système TAT opérationnel avec un plasma d'air.

L'étude de la combustion assistée par plasma thermique de combustibles pauvres vient dans l'étape suivante. Le principal challenge consiste à assurer le meilleur transfert de l'énergie contenue dans le plasma vers le mélange réactif d'air et de combustible pauvre pour obtenir une combustion complète. Pour cela, on déterminera soigneusement l'efficacité de l'allumage, les caractéristiques de la flamme générée et la composition des gaz d'échappement. Des simulations numériques seront effectuées pour obtenir ces informations et le pilote actuel subira les modifications technologiques nécessaires accompagnées des essais de validation.

La phase suivante consiste à exploiter les résultats précédents pour évaluer le rendement énergétique d'une version industrielle de ce bruleur doté de plusieurs Torche à Arc Triphasé pour une puissance de l'ordre de 1MW. A ce stade, une grande attention sera accordée aux contraintes d'exploitations industrielles comme la complexité technologique et l'aspect financier.

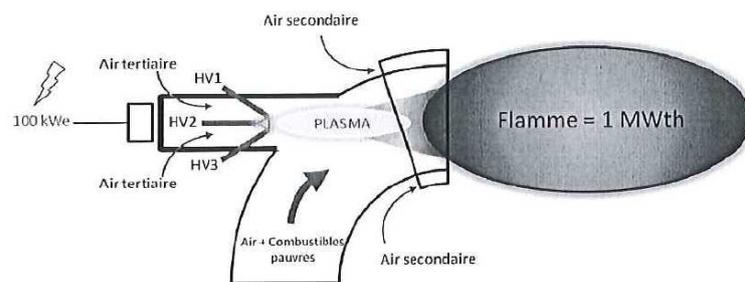


Figure 1. Schéma de principe du concept de l'électro-brûleur plasma triphasé

## Premiers Résultats

Afin de résoudre la problématique d'érosion des électrodes en graphites en milieu oxydant, nous avons opté pour un compromis entre le contrôle aérodynamique du flux autour des électrodes et le contrôle de la composition chimique dans la zone inter-électrodes. Ceci est réalisé en injectant de l'azote autour de chaque électrode pour créer un gainage de protection contre l'air. On injecte également du noir de carbone

avec l'air pour que le carbone puisse réagir avec l'oxygène et produire du CO qui est neutre vis à vis du carbone graphite des électrodes. Le noir de carbone injecté est une poudre de carbone de haute pureté avec des tailles moyennes de particules de quelques dizaines de nm. Les différents essais effectués pour évaluer les taux d'érosion des électrodes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Le débit d'azote dédié à la protection des électrodes est égal à  $3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . L'essai 2 montre qu'en présence de l'air, le taux d'érosion est supérieur à celui obtenu en injectant l'azote seulement. En Présence de monoxyde de carbone, le taux d'érosion est minimal et est simplement dû à l'arrachement de matière lors de l'amorçage de l'arc. Par conséquent, l'ajout de noir de carbone de type Y50A permet de réduire l'effet érosif de l'air grâce à la production de CO par réaction entre l'oxygène et le carbone. On note également dans ce dernier cas une diminution du taux d'érosion au niveau des éléments de protection en graphite du réacteur.

	Débit de gaz				Masse érodée par électrode (g.h <sup>-1</sup> )	Longueur érodée (mm.h <sup>-1</sup> )
	Débit Azote (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Débit Air (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Débit noir de carbone (g.h <sup>-1</sup> )	Débit CO (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )		
Essai n°1	5,2	0	0	0	5,10	15,66
Essai n°2	3,6	2	0	0	23,48	43,6
Essai n°3	4,87	0	0	0,84	2,72	6,57
Essai n°4	3,6	2	434 (C/O=1)	0	17,06	37,35

Tableau 1 Bilan des essais effectués avec les différents débits de gaz et les taux d'érosion

## Conclusion

Les essais réalisés jusqu'à maintenant ont permis de quantifier les taux d'érosions dans différentes conditions opératoires. La prochaine étape consiste à apporter les modifications technologiques nécessaires pour diminuer encore l'érosion en milieu oxydant. Le noir de carbone injecté pour neutraliser l'effet érosif de l'oxygène sera remplacé par le même combustible pauvre injecté en flux secondaire tout en gardant le ratio C/O optimal.

## Références

- [1] M. Combarous, « Les consommations d'énergie dans le monde : une méthode robuste de prévision de leur évolution à moyen terme ; premières conséquences », C. R. Geoscience 335 943-950 (2003)
- [2] L. Viguié, « The costs of the Kyoto Protocol in the European Union », Energy Policy 31 459-481 (2003)
- [3] M.F. Akorede, « Mitigating the anthropogenic global warming in the electric power industry », Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 2747-2761 (2012)
- [4] S. LI, « Modélisation d'un incinérateur de boues en lit fluidisé en vue de la maîtrise des émissions de NOx » Thèse doctorale de l'Institut Polytechnique De Grenoble (2008)
- [5] F. Fabry, « Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review » Waste Biomass Valorization (2013)
- [6] I. Pfaff, « Comparative Thermodynamic Analysis and Integration Issues of CCS Steam Power Plants Based on Oxy-Combustion with Cryogenic or Membrane Based Air Separation » Energy Procedia 1 495-502 (2009)
- [7] A.S. Askarova, « Plasma-Supported Coal Combustion in Boilers Furnace » IEEE Transactions on Plasma Sciences, Vol. 35, N°6, (2007)