

# NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR LES BRÛLEURS DOMESTIQUES ET INDUSTRIELS

CMEFE - Groupe de Compétences en Mécanique des Fluides et procédés Énergétiques  
[www.eig.unige.ch/cmefe](http://www.eig.unige.ch/cmefe)

Jean-Bernard MICHEL\* , Prof. Dr.

*Ecole d'Ingénieurs de Genève, CH-1201 Genève*

Tel. : +41 (0)227932125, E-mail : [michel@eig.unige.ch](mailto:michel@eig.unige.ch), Web : <http://eig.unige.ch/cmefe>

(\*) *Auparavant au Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, Neuchâtel*

## INTRODUCTION

Cet article présente tout d'abord quelques tendances concernant les développements des brûleurs, des méthodes de contrôle de la combustion, en particulier les nouveaux capteurs («smart sensors») et l'application de techniques modernes de la régulation. Les applications de ces techniques dans deux projets sont brièvement exposées :

- Le nouveau capteur « Neuroflame » développé par le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique avec plusieurs partenaires académiques et industriels. Contrairement aux autres capteurs celui-ci permet un diagnostic de flamme sans contact en utilisant un détecteur de flamme optique avec une méthode particulière de traitement du signal.
- La chaudière « Bioflam » développée dans un projet européen et destinée à la combustion de bio-mazout ou biofuel. Le projet inclut plusieurs innovations technologiques : la gazéification autothermique du biofuel, la combustion dans un brûleur poreux avec une variation de charge de 1:10 et très bas NO<sub>x</sub> , la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage dans une chaudière de type « multijet »<sup>TM</sup> de la société Hoval

## RÉGULATION DE LA COMBUSTION

La régulation des flammes est une partie du processus complet de chauffage domestique ou industriel qui consiste à allumer et à maintenir le processus de combustion d'une manière optimale. L'objectif comprend les trois "P": Procédé, Performance et Pollution comme indiqué ci-dessous.

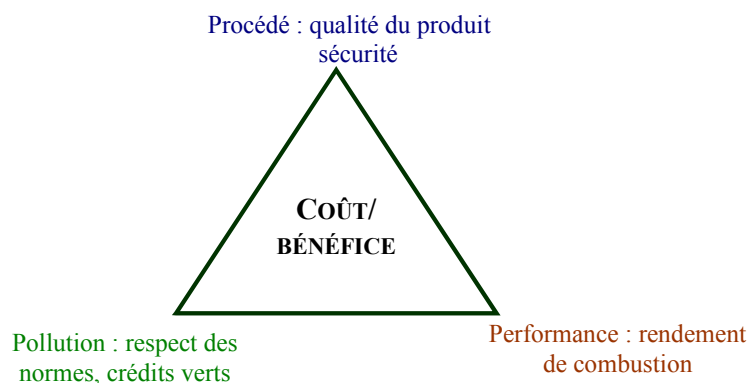


Figure 1 – Les trois « P »

- Les objectifs de procédé sont exprimés en termes de quantité et qualité du produit

- Les objectifs de performance de combustion concernent le rendement thermique, et le taux de conversion du combustible (100% dans de bonnes conditions)
- Les objectifs relatifs à la pollution sont bien sûr le respect des normes d'émission (gaz toxiques et gaz à effet de serre, poussières et suies, déchets toxiques). En outre on doit aussi tenir compte de la possibilité d'acheter et de vendre des crédits d'émission de CO<sub>2</sub>.

### TENDANCES DU MARCHÉ ET DE LA TECHNOLOGIE

En matière de chauffage, le marché a vu ces dernières années une importante diminution du nombre de producteurs de brûleurs, de chaudières et de systèmes de contrôle. Suite à des fusions successives, tendance qui va encore continuer, quelques grandes sociétés se partagent le marché. Par ailleurs le marché a subi une stagnation en Europe. La pression sur les prix est donc très grande et les innovations technologiques visent principalement une réduction des coûts de production et de maintenance. Pour le chauffage domestique, ceci explique la forte pénétration des chaudières **murales** par rapport aux chaudières au sol, et l'augmentation importante des chaudières **modulantes et avec condensation** dans tous les pays d'Europe. Dans certains pays comme le Royaume Uni, la condensation va d'ailleurs devenir obligatoire.

Une autre tendance importante provient de la réglementation environnementale : le respect des normes d'émission (NO<sub>x</sub>, CO, particules) et la **réduction des émissions de gaz à effet de serre**, en particulier le CO<sub>2</sub> et le méthane. De ces deux points de vue - la condensation et les émissions polluantes - le gaz naturel conserve un avantage clair par rapport au mazout. En effet, la technologie de condensation n'est pas favorable au mazout à cause du soufre qui demande des aciers plus résistants et coûteux ; la mise en œuvre de la modulation des brûleurs à mazout est délicate car la pulvérisation des gouttelettes demande une forte pression du fluide, que l'on n'arrive pas à maintenir avec les petits débits ; d'autre part les émissions de CO<sub>2</sub> sont nettement plus basses avec le gaz naturel. Dans ce contexte, le projet Bioflam avait pour but principal de pallier ces inconvénients.

La réduction des coûts, et l'amélioration des performances des brûleurs (gaz et mazout) passe nécessairement par l'introduction de systèmes de régulation à moindre coût, plus rapides et efficaces. Ainsi, la régulation électropneumatique des brûleurs à gaz modulants est peu à peu remplacée par une régulation complètement électronique, où toutes les fonctions de commande et de sécurité des actionneurs (allumeur, ventilateur, vanne de sécurité, vanne gaz...) sont intégrées dans le boîtier de commande.

Pour ces nouveaux développements, on fait appel aux méthodes de prototypage rapide, à l'utilisation de microcontrôleurs (microprocesseurs dédiés) et de capteurs dits « intelligents » car le traitement de signal y est optimisé pour la tâche de régulation à accomplir. Ceci s'applique autant au système de chauffage dans son ensemble [1] qu'au contrôle de la combustion lui-même [2], [3].

### LES NOUVEAUX CAPTEURS POUR CO ET O<sub>2</sub>

Aujourd'hui, les contrôleurs de brûleur fonctionnent en commande a priori (ou boucle ouverte) pour l'ajustement du rapport air/gaz. Il n'y a pas, comme sur les automobiles, de rétroaction à partir d'une mesure de l'excès d'air (sonde lambda) qui viendrait corriger le réglage des actionneurs. Face à ce constat, quelques sociétés ont développé des capteurs à couche mince avec les technologies qui s'inspirent de la fabrication de circuits intégrés (CMOS) et d'autres qui consistent à empiler plusieurs couches l'une sur l'autre (screen-printing) [4],[5], [6].

D'autres approches de la mesure de l'excès d'air utilisent des techniques indirectes. C'est le cas du système Scot (de Ruhrgas/ Stiebel Eltron) utilisant le signal d'ionisation pour le réglage des flammes de gaz pré-mélangées. L'approche de CSEM avec le capteur Neuroflame se veut plus universelle, puisqu'elle s'applique à tous les types de brûleurs.

## LE CAPTEUR « NEUROFLAME »

### Présentation du concept et du projet

Le concept Neuroflame a déjà donné lieu à plusieurs publications [2], [3] et fait l'objet d'un brevet du CSEM. La méthode est présentée schématiquement sur la Figure 2. Elle consiste à utiliser la « signature de flamme » pour la surveillance et le contrôle des brûleurs à air soufflé. Par signature de flamme on entend ici le signal d'un détecteur optique de flamme (dans le spectre ultraviolet ou infrarouge selon le type de détecteur). Ensuite, un traitement adéquat de ce signal permet de déterminer la qualité de la combustion, en particulier :

- La stabilité des performances dans le temps (identification des dérives de réglage)
- L'excès d'air.

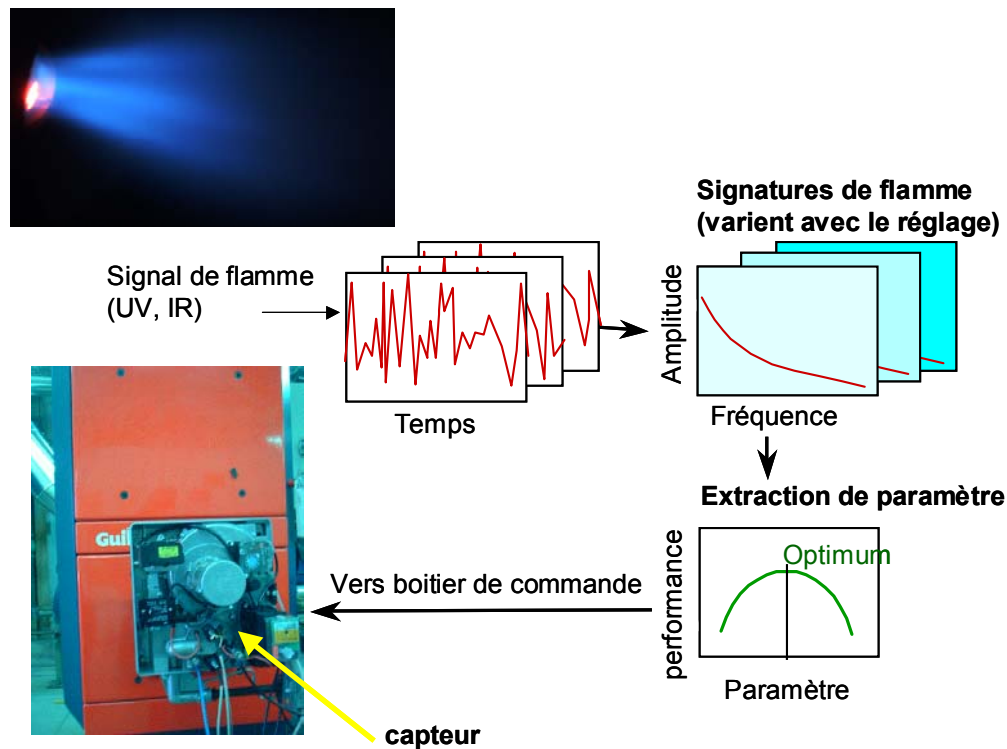


Figure 2 – Principe du capteur Neuroflame

Plusieurs partenaires ont apporté leur savoir-faire à la réalisation et aux essais de prototypes, qui sont à présent en phase d'essais de terrain sur des brûleurs domestiques et industriels. La liste en est donnée au chapitre « remerciements ».

Le produit a évolué à travers plusieurs versions successives pour finalement aboutir au prototype de démonstration actuel, dont on voit un exemplaire sur la Figure 3. Le traitement de signal est basé sur une analyse spectrale en ondelettes (wavelets) qui donne l'équivalent d'une puissance spectrale par bande de fréquence. Une série de 9 bandes de fréquences est employée, ce qui fournit 9 paramètres représentatifs de la signature de flamme.

L'échantillonnage est fait pendant 5 secondes ce qui permet de définir la moyenne et l'écart type de chacun des paramètres. Dès qu'un paramètre dépasse la plage de variation autorisée, une alerte est donnée par le circuit, qui se traduit par l'allumage de lampes témoins selon la

grandeur de l'écart et le nombre de paramètres anormaux. L'étalonnage du capteur est propre à chaque installation et se fait automatiquement lors de la mise en service ou de la révision périodique.



*Figure 3 – Capteur Neuroflame avec son boîtier de traitement du signal*

De plus, les paramètres mesurés sont étroitement corrélés avec l'excès d'air au niveau du brûleur fournissant ainsi une détermination relative de celui-ci pour un réglage en continu.

### **Résultats principaux**

Plusieurs centaines de tests ont été effectués sur des brûleurs et des installations différentes, dans une plage de puissance allant de 100 kW à 36 MW. Ces installations étaient tout d'abord celles du Laboratoire de Génie Thermique de l'EIVD, puis celle de la Compagnie Européenne de Brûleurs (marques Cuénod et Elco) et enfin une chaudière de chauffage urbain des Services Industriels de Genève (2 \* 18 MW). Des essais de terrains sont à présent effectués par les partenaires industriels.

Dans toutes les conditions d'essais, on a pu montrer la fiabilité de la signature de flamme comme indicateur à la fois du rapport air/gaz et des dérives de fonctionnement par rapport à la valeur normale.

Un exemple de corrélation entre la valeur mesurée de l'oxygène résiduel et la valeur calculée est donné sur la Figure 4 pour cette même chaudière. Il est important de noter qu'il s'agit de la valeur produite par le brûleur supérieur, celui du bas n'étant pas en service. Cette méthode permet donc d'équilibrer les débits d'air à chaque brûleur, ce qui n'est pas possible avec une mesure de O<sub>2</sub> dans les fumées qui n'est qu'une valeur moyenne des deux brûleurs. Avec une telle puissance thermique, le potentiel d'économie est très important, ne serait-ce qu'avec un gain de 0.5% du rendement thermique global (près de 9 m<sup>3</sup>/h de gaz !). D'autre part, en améliorant la précision du réglage de l'air sur chaque brûleur, on réduit en même temps les émissions de CO<sub>2</sub>, CO et NO<sub>x</sub>.

Les essais montrent qu'une variation de 0.5% vol. de O<sub>2</sub> par rapport à la valeur nominale est toujours bien détectée par le capteur, ceci même après plusieurs semaines d'arrêt de l'installation sans devoir effectuer un nouvel étalonnage.

Ce capteur est donc tout à fait adapté pour la maintenance préventive et également pour la régulation de l'excès d'air. Son industrialisation prochaine dépendra principalement des stratégies commerciales des partenaires industriels.

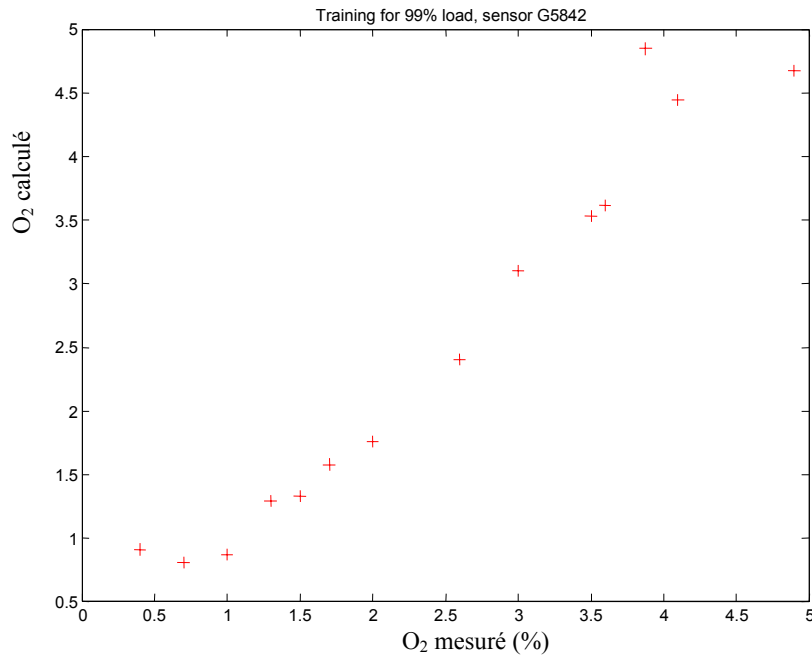


Figure 4 – Exemple de corrélation entre les valeurs calculées et estimées de l’oxygène résiduel (chaudière 51, 9 MW)

#### LA CHAUDIÈRE BIOFLAM

Le projet qui a commencé en janvier 2001 vise le développement d’un système de chauffage à mazout avec les caractéristiques suivantes:

- Capable de fonctionner avec des bio-fuels, soit des mélanges de mazout et d’huiles agricoles ou de cuisine recyclées et esthérifiées.
- Réduction de 50% des émissions de NOx en comparaison des chaudières classiques
- Modulation de 2 kW à 20 kW de la puissance thermique entrante
- Avec condensation et neutralisation des condensats
- Coût: € 2500,--

La Figure 5 présente le schéma du système et des capteurs/actionneurs utilisés pour son contrôle. Plusieurs versions du prototype ont été produites et testées par les partenaires avec, à chaque fois des essais conduits à l’EIVD (Yverdon) et au CSEM (Neuchâtel) afin de développer un système de contrôle sûr et fiable, capable de recevoir la certification du TÜV.

Les essais ont notamment montré que la détection de la flamme devait se faire au moyen d’une électrode d’ionisation modifiée, insérée dans un trou traversant le brûleur poreux. L’effet de la forme des électrodes, de leur position et de la fréquence du courant d’alimentation a donné lieu à des développements importants [3].

Finalement un système de contrôle a été conçu et réalisé avec une séquence de fonctionnement en trois étapes principales, cf. Figure 6 :

- Le mode “démarrage”
- Le mode “transition”
- Le mode “stationnaire”

Le mode “démarrage” est utilisé pour préchauffer le vaporiseur à puissance est maximale. Le vaporiseur est utilisé comme un foyer classique avec une flamme de biofuel pulsé.

Le mode “transition” est enclenché lorsque les températures du vaporiseur et de l’air primaire (préchauffé) sont suffisantes de maintenir la réaction de gazéification partielle du biofuel et sa combustion subséquente dans le brûleur poreux. D’autre part, on doit attendre que les températures soient stabilisées et au dessous de la température d’auto-inflammation du biofuel (vers 600°C).

Le mode “stationnaire » est alors activé et on allume le brûleur poreux. Après un temps de stabilisation, le brûleur peut alors fonctionner en continu avec modulation des débits de biofuel et d’air.

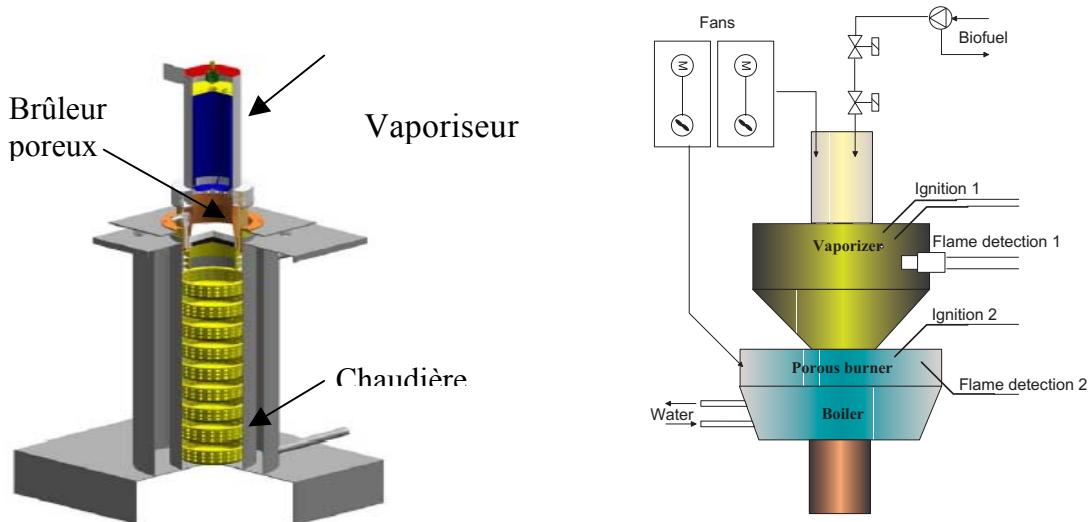


Figure 5 – Schéma de l’unité Bioflam et capteurs/actionneurs pour le contrôle

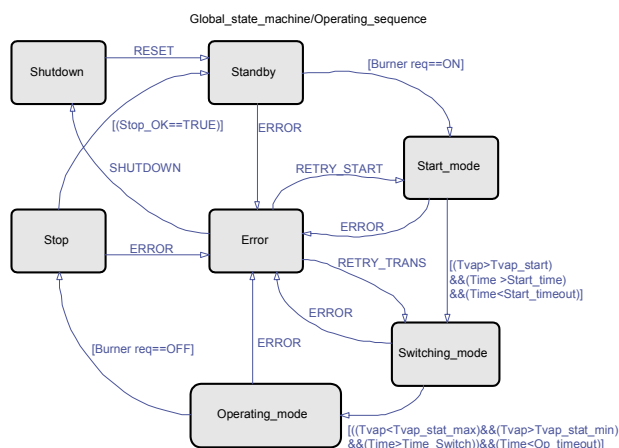


Figure 6 – Schéma de principe de la machine d’états

## CONCLUSIONS

L'innovation technologique est indispensable à l'économie et en particulier au marché du chauffage domestique et industriel. La pression sur les coûts, la demande de produits toujours plus efficaces et plus favorables au développement durable demande une approche pluridisciplinaire des problèmes. Cet article a montré quelques innovations dans le domaine de la régulation et des capteurs intelligents, en particulier une nouvelle approche de la surveillance des brûleurs. Ainsi, la fiabilité des installations thermiques peut être encore accrue d'abord par une meilleure maintenance préventive des brûleurs en identifiant suffisamment tôt leurs dérives de fonctionnement. Ensuite, il s'agit de mettre en place des boucles de réglage adaptatif qui améliorent les performances sur tous les plans : produit, rendement thermique et pollution. L'industrie suisse et européenne est en avance sur les autres pays dans ce domaine et c'est en particulier avec les efforts de recherche et développement ainsi qu'avec la coopération internationale qu'elle pourra maintenir cette avance.

## Remerciements

L'auteur remercie tout particulièrement la SSIGE (fonds FOGA, CH), la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CH), la Commission Européenne et l'Office Fédéral de l'Education et de la Science (CH) pour leur soutien ainsi que l'ensemble des partenaires :

Projet Neuroflame : CSEM (Neuchâtel), Honeywell/Satronic (Dielsdorf), Association Suisse d'Inspection Technique (Yverdon), Compagnie Européenne de Brûleurs (Annemasse, F.), Ecole d'Ingénieurs de l'Etat de Vaud (Yverdon), LAMTEC (Baden, D.), Services Industriels de Genève.

Projet Bioflam: OMV Aktiengesellschaft, Vienne (A), CSEM (Neuchâtel), Energie und Stofftransport RWTH-Aachen - Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg - Hoalwerk AG Vaduz - Instituto Superior Técnico, Lisbon - National Technical University of Athens - PTC-Plasma Jet Technical Coating SA, Novazzano (CH).

## Références

- [1] J. Krauss, M. Bauer. « NEUROBAT – a self-commissioned heating control system » Sensors Application, Vol 2, Wiley-VCH, April 2001
- [2] J.-B. Michel. « Combustion Control – From Myths to Reality ». Keynote paper. 6<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Lisbonne, Avril 2002. ISBN – 972-8034-05-9
- [3] J.-B. Michel et al. « Sensors and Methods for Control of Modulating Burners ». Third european conference on small burner technology and heating equipment. Aachen, Sept. 2003
- [4] [www.lamtec.de](http://www.lamtec.de)
- [5] [www.escube.de](http://www.escube.de)
- [6] [www.steinel.ch](http://www.steinel.ch)
- [7] Trimis D. et al. (2003) BIOFLAM Project: Application of liquid biofuels in new heating technologies for domestic appliances based on cool flame vaporization and porous medium combustion, 7th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, July 2003.