

# Développement de démonstration de brûleurs Ultra bas NOx

Projet DEMOXYA

Janvier 2016<sup>(i)</sup>

N° de contrat : 1381C0044

Projet de recherche coordonné par : *BABCOCK WANSON<sup>(i)</sup>*

Auteur : *Delphine ANRES – BABCOCK WANSON – Département développement brûleurs  
Direction Ligne de produits – 7 Boulevard Alfred Parent BP 52 – 47600 –Nérac*

**Coordination technique ADEME : FIANI Emmanuel – Direction\Service : ANGERS DPED SEET**



**SYNTHESE DE RECHERCHE**

## REMERCIEMENTS

Delphine Cottet – ADEME  
Emmanuel Fiani – ADEME  
Jean Terrier – GrDF  
Gregory Verbrugghe – GrDF  
Bruno Renou – INSA ROUEN  
Marc Bellenou – ENSMA  
Pascal Lebois – GRTGaz

## CITATION DE CETTE SYNTHÈSE

ADEME. Delphine ANRES 2016. Développement de démonstration de brûleurs Ultra low NOx – Synthèse. 11.  
Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr), rubrique Médiathèque [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)

### En français :

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.

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Moyens analytiques</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Simulations numériques</b> .....	<b>4</b>
2.1. Brûleur gaz / Influence de la charge foyer .....	4
2.2. Analyse de l'influence du taux de recirculation externe des fumées sur la longueur de flamme .....	5
<b>3. Conception et essais brûleurs prototypes</b> .....	<b>6</b>
3.1. Essais expérimentaux .....	6
3.2. Prototypes Gaz .....	6
Prototype NOx < 60 mg / Grande plage de modulation (1 à 15) .....	6
Prototype NOx < 80 mg / Très grande plage de modulation (1 à 40) .....	6
3.3. Prototypes FOD .....	7
Injection multipoints pulvérisation mécanique .....	7
Injection multipoints pulvérisation assistée .....	7
3.4. Essais de recirculation sur brûleurs gaz et FOD .....	8
<b>4. Bilan et valorisation</b> .....	<b>8</b>
4.1. Bilan technique des brûleurs développés .....	8
4.2. Bilan économique des brûleurs gaz développés .....	9
4.3. Estimation retour sur investissement .....	9
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>11</b>

---

## INTRODUCTION

Le projet DEMOXYA porte sur des mesures primaires permettant la réduction d'émissions de NOx à la source, sans utiliser de techniques secondaires et en particulier les techniques SNCR (Selective Non Catalytic Reduction) ou SCR (Selective Catalytic Reduction).

Dans le cadre de DEMOXYA, les verrous spécifiques suivants sont étudiés :

- Exploitation simultanée et maîtrisée des différents principes de réduction à la source : recirculation des fumées, étagement de l'injection de combustible, réduction de l'excès d'oxygène.
- Maintien de la stabilité de combustion, malgré l'étagement de la combustion : flamme principale allumée par une flamme primaire stabilisée par accroche-flamme, recherche de températures réduites rendant l'allumage de la flamme plus délicat.
- Maintien de la qualité de la combustion : en vue de limiter l'antagonisme NOx/CO-poussières et de maîtriser l'allongement global de la flamme ainsi qu'en disposant de moyens de contrôle par imagerie.
- Faisabilité industrielle : possibilité de montage/démontage et d'entretien, spécifications pression d'air comburant et puissance ventilateur.

La contribution de Pprime consiste à développer des techniques de visualisation des zones de réaction. En effet, les Laboratoires de Recherche en Combustion ont su développer la mise en œuvre des techniques de mesure laser non intrusives sur des dispositifs à petites échelles mais leur déploiement dans un environnement semi-industriel demeure aujourd'hui encore un challenge. S'il n'est pas envisageable de procéder à la mise en place de diagnostic laser plan quantitatif de type FIL

(Fluorescence Induite par Laser) dans de telles conditions, on peut néanmoins envisager de mettre en place un diagnostic plus simple basé sur l'émission spontanée induite par la présence des radicaux dans les zones en réaction. En effet, elles permettraient d'apporter des éléments de réponses à la question suivante : quelles sont la position et les dimensions caractéristiques du volume occupé par la zone en réaction ?

Les objectifs généraux du projet consistent, pour le cas de chaudières à tubes de fumées de gamme de puissance 3-22 MW à développer et à tester de nouveaux types de brûleurs "ultra-bas-NOx", avec les objectifs de performances suivants :

- Pour les brûleurs gaz
  - o Emissions de NOx inférieures à 60 mg/Nm<sup>3</sup> pour une plage de modulation de 1 à 15
  - o Emissions de NOx maintenues à 80 mg/Nm<sup>3</sup> pour une plage de modulation de 1 à 40
  - o Excès d'air inférieur à 15% sur toute la plage de fonctionnement
- Pour les brûleurs FOD : émissions de NOx inférieures à 120 mg/Nm<sup>3</sup>
- Recherche du minimum d'émissions par la combinaison d'un brûleur "ultra-Bas-NOx" et d'une recirculation externe.

## 1. Moyens analytiques

Les travaux conduits au sein de l'Institut Pprime sont consacrés au développement et à la mise en œuvre de techniques d'imagerie filtrée sur un brûleur de type JHC (jet in heated coflow). Les brûleurs de ce type ont été développés et étudiés depuis un certain nombre d'années pour analyser la combustion diluée en présence d'écoulements d'air très fortement préchauffés. En pratique, la température dans le courant oxydant peut atteindre des niveaux de température voisins de 1000 degrés Celsius, ce qui tend à promouvoir l'auto-allumage du mélange réactif et à favoriser la stabilisation de la flamme dans ce type de conditions diluées. Les conditions opératoires correspondantes sont souvent dénommées HPAC (highly preheated air combustion), MILD (moderate and intense low oxygen dilution combustion), HTAC (high temperature air combustion), FLOX (flameless oxidation) ou bien tout simplement combustion diluée. Le processus de dilution consiste à mélanger, jusqu'à l'échelle moléculaire, le combustible et l'oxydant avec les produits de combustion avant que la réaction chimique ne se produise. La recirculation des gaz brûlés est effectivement le procédé le plus classique pour diluer les réactifs et réduire l'apparition de gradients de température importants. L'objectif est de réduire la température des produits de combustion et la production associée de NOx d'origine thermique (suivant le mécanisme de Zel'dovich). D'un point de vue pratique, l'augmentation de la température du courant oxydant par un procédé standard conduirait à une augmentation de la température de fin de combustion et donc à l'augmentation du niveau de production de NOx. Ce ne sera pas le cas d'une augmentation de température du courant oxydant obtenue par le biais d'une dilution avec des gaz brûlés. En effet, les produits de combustion sont essentiellement inertes et agiront comme un ballast thermique qui limitera donc les niveaux de température de fin de combustion.

Le brûleur JHC développé au sein de l'Institut Pprime a fait l'objet d'une constante optimisation pendant la durée du projet DEMOXYA. Aujourd'hui, deux géométries de brûleur sont disponibles. Le premier brûleur est le fruit d'améliorations successives qui ont été apportées à une géométrie existante. Il s'agissait initialement d'un générateur de gaz brûlés utilisés pour caractériser la dégradation de matériaux aéronautiques soumis à des flux thermiques importants. Ce générateur de gaz brûlés a été employé pour obtenir le courant oxydant à hautes températures et la géométrie a été modifiée pour inclure un jet central de combustible. Une caractérisation complète du brûleur a ensuite été réalisée, elle inclut des cartes de stabilité du brûleur (limites d'extinction, domaine d'hystérésis, etc.), une caractérisation aérodynamique du brûleur réalisée par PIV (Particle Image Velocimetry), des champs de fraction de mélange défini comme un traceur de l'entrée combustible, de l'imagerie de flamme réalisée par P-LIF (Planar Laser Induced Fluorescence) sur le radical OH et enfin par chimiluminescence du radical excité OH\*. Il est effectivement reconnu que la chimiluminescence du radical excité OH\* fournit un excellent traceur du taux de dégagement de chaleur et cette dernière quantité contrôle, dans une large mesure, la production des NOx d'origine thermique. Ce diagnostic fait usage d'un dispositif de filtrage du rayonnement UV et d'une caméra intensifiée (caméra ICCD) pour collecter l'émission du radical excité OH\*. L'ensemble des résultats obtenus a permis de constituer une base de données expérimentales associée à la combustion dans un brûleur JHC.

Dans un deuxième temps, des efforts importants ont été consacrés à la déconvolution des signaux

d'émission  $OH^*$   $s(y,z)$  qui ont été collectés sur les images obtenues par caméra intensifiée. En effet, les images correspondantes ne correspondent pas à des images (coupes) planes d'émission mais sont des images d'émission du radical excité  $OH^*$  qui ont été intégrées le long du trajet optique. Ce qui est une différence remarquable par rapport à des images de fluorescence (P-LIF) sur le même radical  $OH$ , qui résulteraient de l'excitation - par le biais d'une nappe laser - des radicaux  $OH$  présents dans l'écoulement réactif.

Trois types de méthode de déconvolution ont été envisagés pour obtenir la distribution radiale d'émission  $f(r)$ . La première méthode est une procédure géométrique souvent appelée méthode d'*onion peeling*. Elle tient compte de l'homogénéité radiale de l'émission et permet de relier le signal reçu sur chaque élément photosensible de la caméra intensifiée à la contribution de chacune des couronnes d'émission  $f(r_i,z)$ . Elle consiste (i) à évaluer les coefficients contributifs correspondants, qui sont associés aux portions de surface de chacune des couronnes d'émission, (ii) à résoudre un système linéaire qui relie les valeurs  $f(r_i,z)$  aux signaux perçus sur la caméra  $s(y,z)$ . Le système linéaire correspondant est triangulaire, ce qui rend possible l'utilisation d'algorithmes d'inversion particulièrement efficaces. La deuxième méthode s'appuie sur l'utilisation directe de la formule d'inversion d'Abel via l'utilisation d'un algorithme de différences finies. L'algorithme correspondant tient compte des difficultés rencontrées avec la formule d'inversion au voisinage de l'axe de symétrie. Enfin, la troisième méthode s'appuie sur la décomposition de la distribution  $f(r)$  en une série de Fourier qui est suivie par l'inversion d'Abel de chacun des modes de Fourier puis l'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour déterminer le poids de chacun des modes de Fourier. Les trois procédures ont été implémentées et appliquées avec succès sur les images d'émission obtenues avec pour les flammes de Laboratoire.

Cependant, les problèmes liés aux dimensions de l'écoulement co-courant de gaz chauds oxydants ainsi qu'à l'homogénéité de sa composition sont difficiles à résoudre dans cette configuration initiale. C'est pourquoi, en profitant (i) de l'expérience acquise pendant toute la durée du projet et (ii) des discussions constructives menées avec des collègues étrangers déjà confrontés au développement d'un dispositif expérimental similaire, un nouveau brûleur de type JHC a été conçu. Il est basé sur l'utilisation d'un écoulement co-courant de gaz chauds plus large (oxydant et gaz de combustion), qui résulte de 8 brûleurs non-prémélangés équidistants. Le jet central de méthane est quant à lui refroidi par circulation d'eau. Cette nouvelle conception doit permettre d'améliorer l'homogénéité du coflow et de réduire les effets d'hystérésis détectés sur les cartes de stabilité de la version initiale du brûleur.

Enfin, la technique d'imagerie filtrée développée au laboratoire a ensuite été mise en place sur la chaudière à gaz mise en œuvre sur le site de Babcock Wanson. Une campagne de mesures a été entreprise sur la chaudière de démonstration à Nérac (France) en Juillet 2015. Pour appliquer la technique d'imagerie filtrée, plusieurs modifications ont été opérées sur la chaudière. L'une des plus importantes consiste à monter des accès optiques en quartz avec des transmittances qui rendent possible la collecte du signal de chimiluminescence  $OH^*$ . Un grand nombre de points de fonctionnement ont été étudiés, avec différents excès d'air et différentes conditions opératoires, conduisant à la constitution d'une importante base de données expérimentales. Il faut toutefois souligner que, malgré différents pré-traitements des images obtenues, l'application des techniques de filtrage souffre notablement de l'inhomogénéité radiale du signal collecté. Cependant, il faut noter que la qualité des résultats obtenus et la dynamique des signaux mesurés mettent en évidence tout le potentiel associé à la mise en œuvre de techniques de diagnostics laser dans ce type de conditions pratiques. Cela ouvre un certain nombre de perspectives vis-à-vis de leur application future à de telles conditions industrielles.

## 2. Simulations numériques

### 2.1. Brûleur gaz / Influence de la charge foyer

Le sujet de cette première analyse numérique est l'étude de l'influence de la charge thermique du foyer sur les émissions d'oxydes d'azote d'un brûleur gaz naturel sur chaudière vapeur à tubes de fumées.

#### Données de l'étude

Le brûleur choisi pour cette simulation est le brûleur standard BABCOCK WANSON LNTA 330. Trois cas de calculs sont réalisés : le brûleur est implanté sur trois foyers différents à puissance constante. Le combustible est le gaz naturel et le comburant de l'air.

Les modèles employés sous Fluent sont le modèle de turbulence « realizable k $\epsilon$  », la combustion turbulente non prémélangée « pdf », le modèle de flammelettes stationnaires et celui des ordonnées discrètes pour le rayonnement.

Concernant la formation des oxydes d'azote, le « post-processeur NOx » du logiciel FLUENT est utilisé pour prédire les émissions de NO. Ces émissions résultent de plusieurs mécanismes réactionnels :

- ✓ mécanisme de production « thermique »
- ✓ mécanisme de « reburn »
- ✓ mécanisme faisant intervenir l'intermédiaire N<sub>2</sub>O
- ✓ mécanisme des « oxydes d'azote précoces »

#### Résultats obtenus

La mise en œuvre du post-traitement des NOx a été faite en plusieurs étapes : chaque étape utilisant une partie seulement des quatre mécanismes de production et réduction, permettant ainsi de quantifier l'apport de chaque mécanisme :

- L'effet du mécanisme « reburn » prédit par le post-traitement NOx est de reconverter 50 % des NOx thermiques en azote
- Le mécanisme de l'intermédiaire N<sub>2</sub>O contribue pour moins que 15 % à la production nette totale.

Il ressort également que la longueur de flamme, stœchiométrique ou thermique, reste identique d'un cas à l'autre. De plus, dans le cas le plus confiné, la longueur thermique est très proche de la longueur du foyer et la température de sortie du foyer augmente avec le confinement.

De plus, la comparaison des résultats obtenus sur les différentes géométries permet de démontrer que la variation de diamètre du foyer modifie l'épaisseur et la longueur de la zone de recirculation. Ainsi, l'augmentation du diamètre du foyer permet une forte augmentation du débit de fumées recyclées à l'intérieur du foyer.

Ces données permettent d'aboutir à une loi d'estimation des variations des émissions de NOx en fonction des variations des dimensions du foyer et permettent d'établir un outil prédictif qui approche, de manière qualitative, le taux de NOx d'un brûleur de notre gamme Babcock-Wanson en fonction de la géométrie du foyer.

Cet outil sera mis en application comme une aide pratique pour répondre aux appels d'offres, nous permettant ainsi de prendre des engagements contractuels maîtrisés.

## 2.2. Analyse de l'influence du taux de recirculation externe des fumées sur la longueur de flamme

Le sujet de cette seconde analyse numérique est l'étude de l'influence du taux de recirculation externe des fumées sur la longueur de flamme d'un brûleur gaz naturel sur chaudière vapeur à tubes de fumées.

#### Données de l'étude

Le brûleur choisi pour cette simulation est le brûleur standard BABCOCK WANSON LNTA 330. Le modèle employé sous Fluent est le même que précédemment.

Le sujet initialement prévu a été élargi et sept cas de calculs sont réalisés pour étudier l'influence de divers paramètres sur les dimensions de flamme :

Cas 1 : cas de référence : cas central

Cas 2 : avancement de la tête du brûleur : cas côte A réduite

Cas 3 : recul de la tête du brûleur : cas côte A augmentée

Cas 4 : diminution de la puissance

Cas 5 : augmentation de la puissance

Cas 6 : augmentation de la pression foyer

Cas 7 : recirculation des fumées

#### Résultats obtenus

✓ **Influence de la cote A** : comme pressentit, ce paramètre permet une légère évolution de la forme de flamme. Une cote A réduite génère une flamme plus large et plus courte, moins « fuselée ». Les calculs numériques permettent d'approcher une estimation : la réduction de la longueur de flamme semble de l'ordre de 5 - 6 % pour la cote A la plus petite.

✓ **Influence des variations de puissance** : le modèle numérique montre qu'elles n'ont pas d'influence sur la forme de flamme. Il démontre un déplacement des températures maximales, ces températures restant d'ailleurs constantes. Seule la température moyenne de sortie varie : abaissement à faible charge (5,3 MW) compte tenu de l'augmentation du temps de séjour des fumées échangeant avec la paroi du foyer.

- ✓ **Influence de la pression foyer** : le modèle numérique montre que ce paramètre n'a aucune influence.
- ✓ **Influence du taux de recirculation externe des fumées** : contrairement à ce qui était attendu, le modèle ne prédit pas une augmentation de la longueur de flamme. L'abaissement de la teneur en O<sub>2</sub> de l'air comburant et l'effet de dilution réduisent sensiblement les températures maxi et la température moyenne sortie foyer.

### 3. Conception et essais brûleurs prototypes

#### 3.1. Essais expérimentaux

L'objectif est de réaliser expérimentalement les essais de tous les brûleurs prototypes développés. Chaque configuration devra répondre à un certain nombre de critères de qualité de combustion pour être validée. Voici la liste de ces critères, classés par ordre de priorité :

- Stabilité (comportement en régime stabilisé, comportement lors de régimes transitoires rapides, comportement en manque et tenue à l'excès d'air)
- Dimensions de flamme (diamètre et longueur)
- Aspect de la flamme
- Bruit
- Le taux d'émission de CO : niveau acceptable CO < 5 ppm
- Le taux d'émission de NO<sub>x</sub>
- Le taux d'O<sub>2</sub> dans les fumées
- Le taux de modulation

Les objectifs de taux d'émission de NO<sub>x</sub> sont exprimés en « mg/Nm<sup>3</sup> » et ramené à un taux d'oxygène dans les fumées de 3 %. Cependant ces valeurs sont influencées par la température et l'humidité de l'air de combustion.

Pour cela, nous analyserons des concentrations en NO<sub>x</sub> des produits de combustion secs et exempts d'air exprimés en mg/kWh qui pourront ensuite être ramenés à des conditions standards d'humidité et de température.

Pour une combustion au Gaz Naturel :  $NO_x \left( \frac{mg}{Nm^3} \text{ à } 3\% O_2 \right) \approx 0,99 \times NO_x \left( \frac{mg}{kWh} \right)$

Pour une combustion au FOD :  $NO_x \left( \frac{mg}{Nm^3} \text{ à } 3\% O_2 \right) \approx 0,95 \times NO_x \left( \frac{mg}{kWh} \right)$

#### 3.2. Prototypes Gaz

##### Prototype NO<sub>x</sub> < 60 mg / Grande plage de modulation (1 à 15)

Le but est de développer un brûleur gaz de 8MW dont les performances sont :

- Ultra bas NO<sub>x</sub>, < 60mg/Nm<sup>3</sup> à 3 % O<sub>2</sub>
- Grande plage de modulation de 1 à 15
- Haut rendement, excès d'air inférieur à 15 % sur toute la plage de fonctionnement

La conception de ce brûleur prototype est basée sur l'utilisation de l'étagement du gaz et de la technique des flammes séparées. Cette particularité a nécessité la conception d'une seconde rampe d'alimentation gaz et la réalisation d'une étude d'amélioration des performances aérauliques.

La première étape a consisté à caractériser le brûleur prototype de référence. Les étapes suivantes sont une étude paramétrique afin de maîtriser et quantifier l'influence de chaque élément : dimensionnement et positionnement des injecteurs gaz, répartition gaz entre les différents niveaux d'injection, influence de la vitesse et de la répartition de l'air dans la tête de combustion.

Les objectifs ont été atteints puisqu'après optimisation, le prototype a donné des rejets NO<sub>x</sub> de 55 mg/kWh, avec une plage de modulation de 1 à 15. La flamme est parfaitement stable et ce quel que soit l'amplitude des variations de charge, avec un excès d'air <15 % maximum.

##### Prototype NO<sub>x</sub> < 80 mg / Très grande plage de modulation (1 à 40)

Le but est de développer un brûleur gaz de 8MW dont les performances sont :

- Très bas NO<sub>x</sub>, < 80mg/Nm<sup>3</sup> à 3 % O<sub>2</sub>
- Très grande plage de modulation de 1 à 40
- Haut rendement, excès d'air inférieur à 15 % sur toute la plage de fonctionnement



La solution retenue est de développer une tête de combustion permettant de mettre en œuvre un circuit d'air secondaire indépendant piloté de manière autonome. Les 2 circuits gaz et les 2 circuits d'air disposent chacun de leur propre organe de régulation.

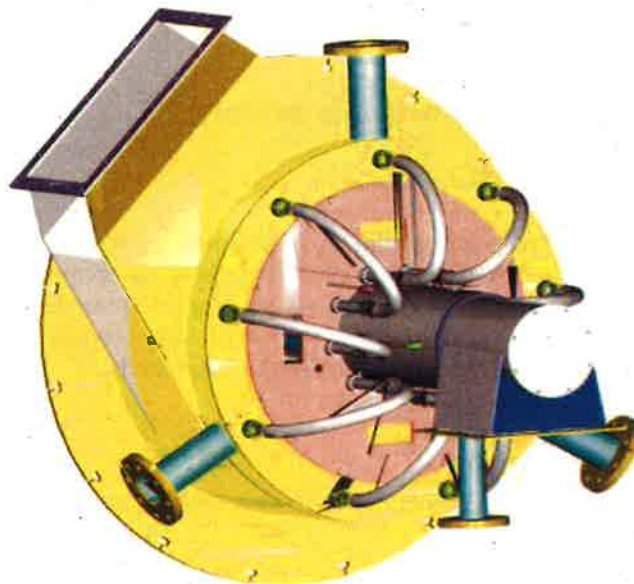


Figure 1 : Vue côté brûleur du prototype < 80mg / Grande plage de modulation (1 à 40)

Le travail s'est fait en 3 étapes, les principales difficultés à lever ont été :

- Parvenir à travailler à 200 kW, à bas taux d'oxygène dans les fumées sans production de CO
- Parvenir à gérer les transitoires sans production de CO, sans pulsation de flamme
- Parvenir à obtenir  $\text{NO}_x < 80 \text{ mg}$  à 8 MW

Les objectifs de très grande plage de modulation 1 à 40 et d'excès d'air <15 % ont été atteints sur notre chaudière de démonstration. Les résultats des émissions de  $\text{NO}_x$  sont de  $90 \text{ mg/Nm}^3$ . Cependant les essais d'optimisation du brûleur ont permis d'observer que l'augmentation de l'excès d'air central permet de réduire la production de  $\text{NO}_x$ . Un redimensionnement du ventilateur central permettrait d'atteindre les objectifs. On notera aussi que le contrôle commande actuel de type « positionneuse » n'est pas assez précis et ne permettra pas de réaliser les mêmes performances dans des conditions industrielles.

### 3.3. Prototypes FOD

Il existe 2 familles de brûleurs fioul domestique en fonction de leur technologie :

- pulvérisation de type mécanique à retour : le combustible doit être de bonne qualité et très fluide pour être pulvérisé correctement avec cette technologie.
- pulvérisation de type assistée à l'air : le principe réside dans l'utilisation d'air comprimé pour créer une pulvérisation fine du combustible. Cette technologie est parfaite pour la combustion de fioul à haute viscosité ou de mauvaise qualité avec forte présence de résidus indésirables.

L'objectif est de développer des brûleurs FOD de 8 MW dont les performances attendues en terme d'émissions sont: Très Bas  $\text{NO}_x$ , <  $120 \text{ mg/Nm}^3$  à 3 %  $\text{O}_2$ .

#### **Injection multipoints pulvérisation mécanique**

La solution retenue est l'injection du fioul en multipoints. Le but étant d'appliquer le principe d'étagement de l'air et du combustible. L'injection du fioul se fera en 5 points : 1 central et 4 périphériques.

#### **Injection multipoints pulvérisation assistée**

La solution retenue est identique au brûleur prototype précédent avec un gicleur central type PHV, (développé par TOTAL et actuellement commercialisé sous licence par Babcock-Wanson) et des gicleurs périphériques assistés à l'air comprimé.

Ces deux prototypes n'ont pas donné satisfaction: malgré de nombreux essais et de nombreuses modifications des configurations, l'objectif de  $120 \text{ mg}$  de  $\text{NO}_x$  n'a pas pu être atteint. Les dimensions



restreintes d'un foyer de chaudière à tubes de fumées a été un facteur limitant dans la mise en œuvre de l'étagement du combustible. Le compromis entre baisse des rejets et conservation de la qualité de la combustion n'a pas pu être trouvé. Le choix de la technologie multipoints est à remettre en cause.

### 3.4. Essais de recirculation sur brûleurs gaz et FOD

Pour les performances des brûleurs prototypes « DEMOXYA » le but est d'obtenir la concentration la plus basse possible jusqu'à atteindre la limite de stabilité de la flamme.

L'abattement des NOx du à la recirculation externe des fumées est très significative, cette technologie est redoutable d'efficacité. Cependant, elle est consommatrice en dimensionnement des ventilations et certains essais ont été limités par la puissance des ventilateurs en place sur la station d'essais. A partir de l'ensemble des résultats, l'analyse semble donner une tendance intéressante : en considérant l'abattement de NOx en mg/Nm<sup>3</sup> à 3 % d'O<sub>2</sub> sur fumées sèches corrigés en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air les résultats sur les différents brûleurs, et même les différents combustibles sont similaires.

Il est possible de déduire une loi de l'abattement des NOx en fonction des taux de recirculation sur les brûleurs BABCOCK-WANSON.

## 4. Bilan et valorisation

### 4.1. Bilan technique des brûleurs développés

Les essais du programme DEMOXYA ont été réalisés sur des prototypes de 8 MW. Les résultats obtenus permettent d'extrapoler le dimensionnement des brûleurs à différentes puissances en tenant compte des données des configurations donnant les meilleurs résultats : vitesse d'air au droit de l'accroche-flamme, vitesse d'éjection du gaz, répartition d'air et du gaz au centre et en périphérie, pertes de charge de la tête de combustion côté air et côté gaz. L'étude menée consiste d'exploiter les données obtenues pour pouvoir les extrapoler sur une gamme de puissance de 2 à 22 MW.

Le bilan est le suivant :

#### BRULEURS GAZ

Performances BRULEURS GAZ	%FGR	Engagements contractuels						Mixité	
		Taux de modulation	O <sub>2</sub> %sec dans les fumées (**)	NOx (*)		CO (*)	SO <sub>2</sub> (*)		Poussières (*)
				Selon NFE	Selon EN676				
Brûleur Bas NOx gaz standard	0	1 à 8	5% - 3%	100	80	100	35	5	0
Brûleur Bas NOx gaz grande plage de modulation	0	1 à 30	3% sur toute la plage	100	80				N
Brûleur Bas NOx gaz standard avec FGR	7	1 à 8	5% - 3%	80	60				0
<b>Module +</b>	0	1 à 12	3% sur toute la plage	80	60				N
Brûleur Bas NOx gaz grande plage de modulation avec FGR	6	1 à 30	3% sur toute la plage	80	60				N
Brûleur Bas NOx gaz standard avec FGR	17	1 à 8	5% - 3%	60	40				0
<b>Module + avec FGR</b>	7	1 à 12	3% sur toute la plage	60	40				N
Brûleur Bas NOx gaz grande plage de modulation avec FGR	17	1 à 30	3% sur toute la plage	60	40				N

(\*) valeurs données en mg/Nm<sup>3</sup> @3% d'O<sub>2</sub> sur fumées sèches

Tableau 1 : Bilan technique – performances brûleurs gaz

## BRULEURS FOD

BRULEURS FOD Performances	Résultats expérimentaux sur BP8		Engagements contractuels					Mixité
	%FGR	NOx (*)	%FGR	NOx (*)	CO (*)	SO2 (*)	Poussières (*)	
				Selon NFE				
Brûleur FOD standard pulvérisation mécanique	0	186	0	200	100	170	50	O
Brûleur Multipoints pulvérisation mécanique	0	163	0	180				N
Brûleur FOD standard pulvérisation mécanique + FGR	<i>décrochement de flamme</i>		17	160				O
Brûleur Multipoints pulvérisation mécanique + FGR	10	153	17	160				N

(\*) valeurs données en mg/Nm3 @3% d'O2 sur fumées sèches

Tableau 2 : Bilan technique – performances brûleurs FOD

### 4.2. Bilan économique des brûleurs gaz développés

La première partie de cette étude a consisté à développer les outils permettant de calculer le gain d'exploitation apportés les nouveaux brûleurs. En effet, outre la baisse des rejets atmosphériques, les prototypes gaz développés dans ce programme ont également les caractéristiques suivantes : travailler à des taux d'oxygène plus bas que les brûleurs standards et augmenter leur plage de modulation.

En comparant un brûleur gaz Bas NOx standard et les prototypes, supposés sur une chaudière à tubes de fumées avec économiseur et régulation d'O2, nous obtenons les résultats suivants :

	Taux de charge moyen annuel			
	20%	40%	60%	70%
Estimation gain de rendement d'exploitation avec <b>Modulo + (*)</b>	1,2 %	0,8 %	0,6 %	0,4 %
Estimation gain de rendement d'exploitation avec <b>ORTHOS (**)</b>	2,0 %	1,6 %	1,4 %	1,3 %

(\*) Prototype gaz avec NOx < 60 mg et modulation de 1 à 12

(\*\*) Prototype gaz avec NOx < 80 mg et modulation de 1 à 30

Tableau 3 : Gains de rendement apportés par les prototypes DEMOXYA par rapport à un brûleur gaz standard

Concernant la recirculation externe des fumées, la problématique est différente puisque cette technologie engendre une dégradation du rendement de l'équipement thermique : -0,1 % pour un taux de FGR de 7 %, et -0,5 % pour un taux de FGR de 20 %.

### 4.3. Estimation retour sur investissement

Le bilan technique permet d'évaluer le surcoût des nouveaux brûleurs par rapport à un brûleur standard actuellement commercialisé, le bilan économique permet d'estimer le gain d'exploitation apporté par ces nouveaux produits : nous pouvons alors aisément calculer le retour sur investissement de ces deux technologies. Quatre cas d'études sont sélectionnés.

	Taux de charge moyen annuel				
	20%	40%	60%	70%	
Temps de fonctionnement annuel					
<b>Chaudières 8 t/h avec économiseur - Modulo + 330</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					
<b>Chaudière 10 t/h avec économiseur - Modulo + 340</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					
<b>Chaudière 20 t/h avec économiseur - Modulo + 700</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					
<b>Chaudière 27 t/h avec économiseur - Modulo + 900</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					

	< 1 an
	entre 1 et 2 ans
	entre 2 et 4 ans
	entre 4 et 6 ans
	> 6 ans

Tableau 4 : Estimation retour sur investissement brûleur **MODULO +**

	Taux de charge moyen annuel				
	20%	40%	60%	70%	
Temps de fonctionnement annuel					
<b>Chaudières 8 t/h avec économiseur - ORTHOS 330</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					
<b>Chaudière 10 t/h avec économiseur - ORTHOS 340</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					
<b>Chaudière 20 t/h avec économiseur - ORTHOS700</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					
<b>Chaudière 27 t/h avec économiseur - ORTHOS 900</b>					
8 000 h					
5 500h					
4 500h					
2 000 h					

	< 1 an
	entre 1 et 2 ans
	entre 2 et 4 ans
	entre 4 et 6 ans
	> 6 ans

Tableau 5 : Estimation retour sur investissement brûleur **ORTHOS** (brûleur à très grande plage de modulation)

Le choix est fait par Babcock-Wanson de lancer la commercialisation du premier prototype gaz.

**BRULEUR *Module+***

Babcock-Wanson  
présente sa nouvelle  
gamme de brûleur gaz

***Module+***

développée en partenariat  
avec l'ADEME



semestre 2015 - 2016



Figure 2 : Première page présentation nouvelle gamme ***Module+***

## CONCLUSION

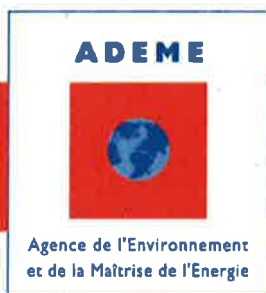
L'ensemble des travaux menés au cours de DEMOXYA ont permis de mieux comprendre, et donc mieux maîtriser différents critères de combustion et leur impact sur les rejets NOx. L'étude du combustible gazeux et du combustible fioul domestique n'ont pas donné les mêmes niveaux de résultats. Cependant, ce projet se termine sur la commercialisation potentielles de deux nouvelles gamme de brûleur. Ces nouveaux produits répondent à la fois aux exigences des futures réglementations sur les rejets atmosphériques et à une augmentation des rendements, apportant ainsi de fortes économies d'énergie à nos clients.



## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

