



**Projet : Etude par visualisation du processus  
de formation de suies dans la flamme de  
diffusion diesel avec concentration  
d'oxygène variable.**

**Date : Juillet 2009**



## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>RAPPEL DES OBJECTIVES ET DE LA MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>PERMÉABILITÉ DES BUSES .....</b>	<b>1</b>
<b>3.</b>	<b>LONGUEUR CARACTÉRISTIQUE DE MÉLANGE.....</b>	<b>2</b>
<b>4.</b>	<b>LOL – LONGUEUR DE LIFT-OFF .....</b>	<b>3</b>
<b>5.</b>	<b>RICHESSSE AU LIFT-OFF .....</b>	<b>5</b>
<b>6.</b>	<b>FORMATION DE SUIES - FSOOT.....</b>	<b>7</b>
<b>7.</b>	<b>SYNTHÈSE .....</b>	<b>8</b>
7.1.	CONCLUSION 1 .....	9
7.2.	CONCLUSION 2 .....	10
7.3.	CONCLUSION 3 .....	10
<b>8.</b>	<b>CONSÉQUENCES PRATIQUES.....</b>	<b>10</b>
8.1.	CONSEQUENCE PRATIQUE 1 .....	10
8.2.	CONSEQUENCE PRATIQUE 2 .....	10

## 1. RAPPEL DES OBJECTIVES ET DE LA METHODOLOGIE

Les objectifs principaux de l'étude peuvent se résumer de la façon suivante : quantifier l'influence :

- d'une réduction importante du diamètre des orifices de la buse
- de l'utilisation d'un taux d'EGR élevé

sur :

- le comportement du lift-off de la flamme
- le processus de formation de suies

Pour cela, les essais ont été réalisés avec :

- Buses monoorifice coniques (pour éviter l'apparition de cavitation qui pourrait fausser les résultats) :  $\varnothing = 50$  et  $70 \mu\text{m}$ .
- Balayage de pression d'injection :  $P_{CR} = 500, 1000$  et  $1500$  bar.
- Balayage d'EGR :  $YO_2 = 23 \rightarrow 13\%$  (le balayage a été arrêté vers  $13\%$  d' $O_2$ , valeur pour laquelle l'on ne visualise plus de suie dans la flamme).
- Visualisation simultanée de la longueur de lift-off (émission ultraviolette des radicaux OH présents dans le front de flamme) et des suies (radiation visible) afin de pouvoir corréler les deux informations même dans le cas d'une forte dispersion cyclique.
- Utilisation du paramètre  $F_{soot} \propto \frac{m_{soot}}{m_{fuel \text{ non brûlé}}}$  référé aux suies présentes localement dans la flamme pour quantifier l'intensité du processus de formation de suies.

Afin de simplifier ce rapport, toutes les définitions détaillées des paramètres utilisés dans l'analyse peuvent se trouver dans le rapport précédent.

## 2. PERMEABILITE DES BUSES

Des mesures de taux d'introduction réalisées après les essais sur moteur optique ont permis de déterminer les coefficients de débit ( $C_d$ ) des deux buses (voir figure 1).

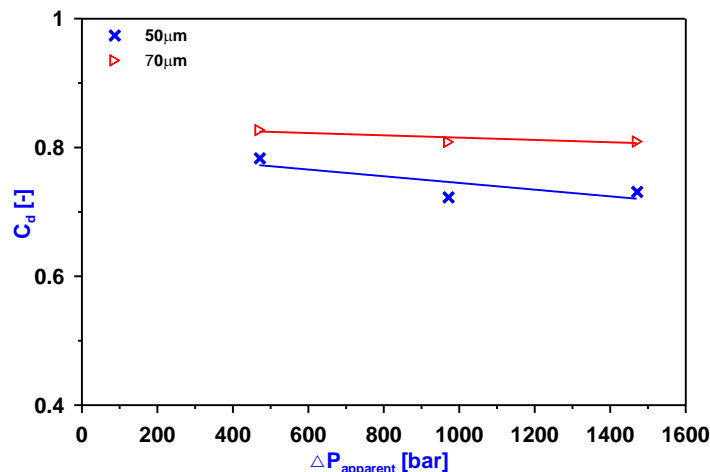


figure 1 :  $C_d$  des deux buses en fonction du  $\Delta P$  apparent.

Les deux buses ont des valeurs de  $C_d$  semblables et, comme c'est souvent le cas pour des buses monotrou axiales, relativement constantes lorsque la pression d'injection varie. Ceci fait que le ratio entre diamètres effectifs  $\frac{\varnothing_{eff-70}}{\varnothing_{eff-50}} = 1.44$  est très proche du ratio entre diamètres nominaux  $\frac{70 \mu m}{50 \mu m} = 1.40$ .

### 3. LONGUEUR CARACTERISTIQUE DE MELANGE

Des essais préliminaires, réalisés dans les mêmes conditions de température et pression dans le cylindre que les essais nominaux mais sans combustion (utilisation de  $N_2$  au lieu de l'air), ont permis de déterminer les longueurs liquides d'évaporation des deux buses, en fonction de la pression d'injection. Ces résultats sont montrés dans la figure 2.

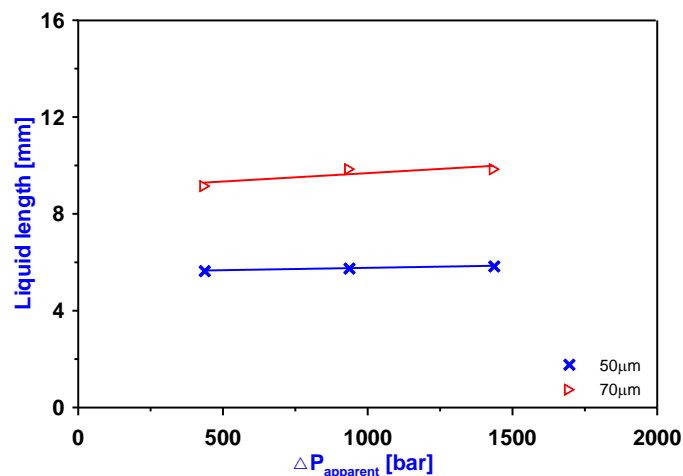


figure 2 : Longueur liquide en fonction du  $\Delta P$  apparent.

Il est communément accepté que cette longueur liquide d'évaporation est, pour des conditions de température et de pression dans le cylindre données, proportionnelle à la longueur caractéristique de mélange. Pour des buses similaires, la longueur caractéristique de mélange est directement proportionnelle au diamètre de l'orifice. Dans notre cas on voit que la différence entre  $\varnothing 50 \mu m$  et  $\varnothing 70 \mu m$  est beaucoup plus accentuée avec  $L_{mix} \propto \varnothing^{1.53}$ . L'effet du diamètre sur la longueur de mélange est donc supérieur à la normale d'un facteur d'environ  $\varnothing^{0.5}$ . Ceci traduit un angle d'ouverture du jet supérieur et un processus de mélange comparativement plus intense pour la buse  $\varnothing 50 \mu m$ .

Dans les cas où la totalité de la flamme n'est pas visible lors des essais ou quand le front de flamme n'arrive pas exactement aux conditions stationnaires, la longueur caractéristique de mélange sert de base pour déterminer une longueur de flamme stationnaire. Dans notre étude, malgré une durée de pulse électrique d'injection de 4 ms, le front de flamme n'arrive pas toujours aux conditions stationnaires, notamment pour de forts taux d'EGR. Nous avons donc choisi d'utiliser des longueurs de flamme stationnaires prédites à partir de l'information expérimentale de longueur caractéristique de mélange plutôt que les visualisations directes de longueurs de flammes dont le front n'est pas

forcement arrivé aux conditions stationnaires. L'effet (dû à la raréfaction en  $O_2$  et à la modification de la température de flamme et, donc, de la densité des gaz brûlés) de la variation de l'EGR sur la longueur de flamme est connu théoriquement et validé par CFD. Les résultats sont montrés dans la figure 3.

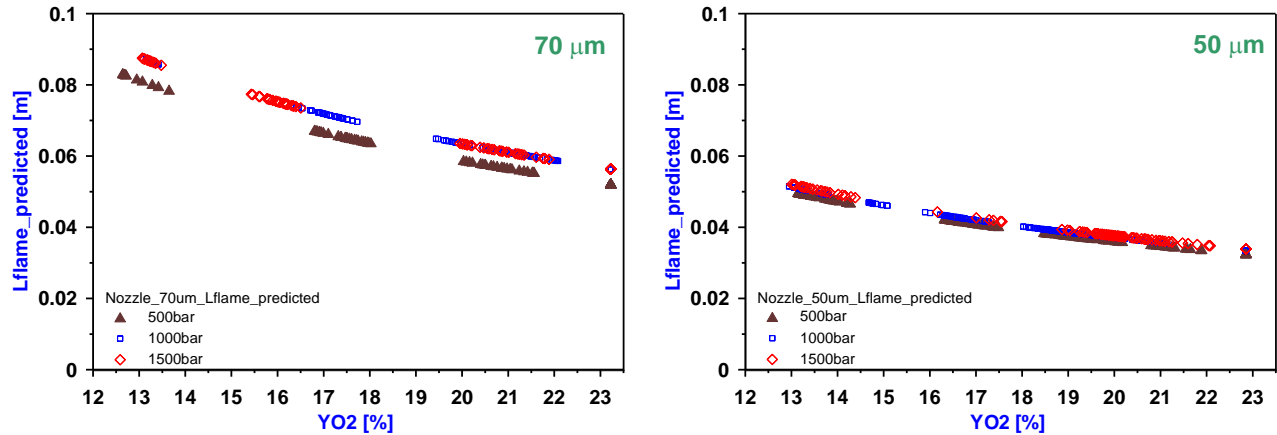


figure 3 : Évolution de la longueur de flamme prédite en fonction de  $YO_2$  pour les deux buses à des pressions d'injection différentes.

#### 4. LOL – LONGUEUR DE LIFT-OFF

Théoriquement et dans le cas de jets gazeux avec des diamètres de buse élevés, la longueur de lift-off est indépendante du diamètre de l'orifice d'injection. Dans le cas de jets diesel, les résultats expérimentaux sont variables mais la base de données la plus étendue (Sandia National Laboratories) donne une relation du type  $LOL \propto \varnothing^{0.34}$ . Les résultats expérimentaux obtenus avec les buses  $\varnothing 50 \mu m$  et  $\varnothing 70 \mu m$  (figure 4) montrent une dépendance  $LOL \propto \varnothing^{0.87}$ , beaucoup plus élevée. L'effet du diamètre sur la longueur de lift-off est, donc, supérieur à la normale d'un facteur d'environ  $\varnothing^{0.5}$ . Ce résultat est à relier à celui obtenu pour la longueur caractéristique de mélange.

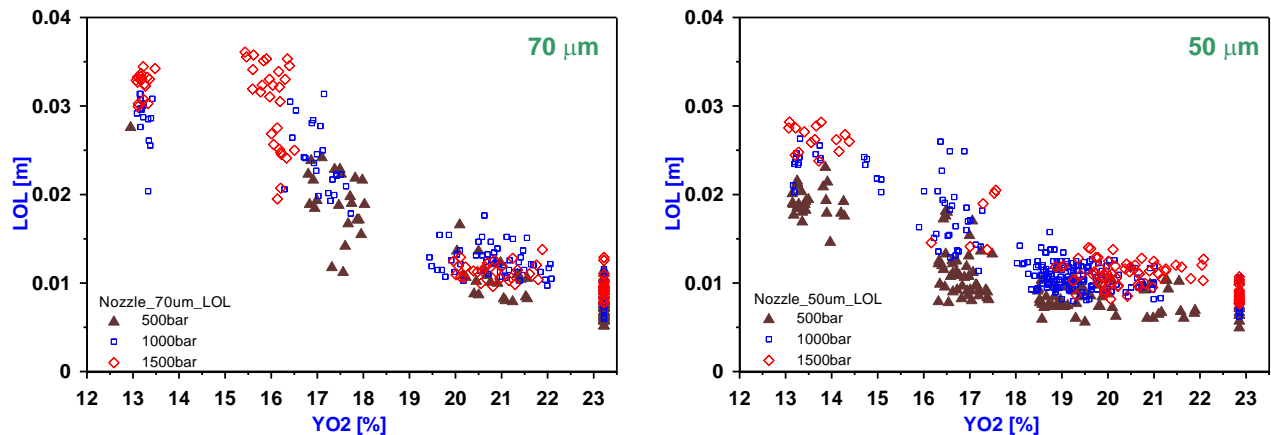


figure 4 : Évolution de LOL en fonction de  $YO_2$  pour les deux buses et à des pressions d'injection différentes.

$$\begin{array}{lcl}
 L_{mix} \propto L_{flam} & \propto & \boxed{\varnothing^1} \cdot \boxed{\varnothing^{1/2}} \\
 LOL & \propto & \boxed{\varnothing^{1/3}} \cdot \boxed{\varnothing^{1/2}} \\
 & & \text{Effet attendu} \qquad \text{« sur-effet »}
 \end{array}$$

Il semble que le processus de mélange plus intense de la buse  $\varnothing 50 \mu\text{m}$ , qui se traduit par une longueur liquide d'évaporation comparativement plus courte, se traduise également par une longueur de lift-off plus courte dans la même proportion. Étant donné que la distance de stabilisation du lift-off dépend principalement d'aspects « chimiques » (combustible, température de flamme, concentration d' $\text{O}_2$ ...) identiques pour les deux buses et d'aspects « physiques » (conditions locales de vitesse et turbulence...) qui dépendent directement du processus de mélange, ce résultat n'est pas étonnant. Ceci dit, ses conséquences a priori sont importantes : à première vue, il semblerait que des actions visant à améliorer le processus de mélange et à réduire la longueur caractéristique du jet et de la flamme (modification de la géométrie de l'orifice, utilisation de la cavitation...) se traduisent également par une réduction de la longueur de lift-off.

On voit donc que, malgré le mélange comparativement plus intense de la buse  $\varnothing 50 \mu\text{m}$ , le ratio  $\frac{LOL}{L_{flam}}$  (qui, pour un taux d'EGR donné, contrôle la richesse du mélange air/carburant juste après le lift-off et donc la formation de précurseurs de suies) se comporte comme on pouvait l'attendre :

$$\begin{array}{lcl}
 L_{flam} & \propto & \varnothing^1 \cdot \varnothing^{1/2} \\
 LOL & \propto & \varnothing^{1/3} \cdot \varnothing^{1/2} \\
 \hline
 \frac{LOL}{L_{flam}} & \propto & \boxed{\varnothing^{-2/3}} \cdot \boxed{\varnothing^0} \\
 & & \text{Effet attendu} \qquad \text{« sur-effet »}
 \end{array}$$

En regardant plus en détail les résultats de longueur de lift-off, on observe une différence de comportement entre les deux buses (figure 5). Alors que pour la buse  $\varnothing 70 \mu\text{m}$  la longueur de lift-off diminue de manière monotone lorsque la concentration d'oxygène augmente, on observe que pour la buse  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  le lift-off semble se fixer à un seuil situé à environ 10 mm de l'injecteur dès que la concentration massique d'oxygène dépasse 17-18%. La conséquence directe de ce comportement est que le ratio  $\frac{LOL}{L_{flam}}$  se voit également affecté par ce seuil, comme montré dans la figure 6.

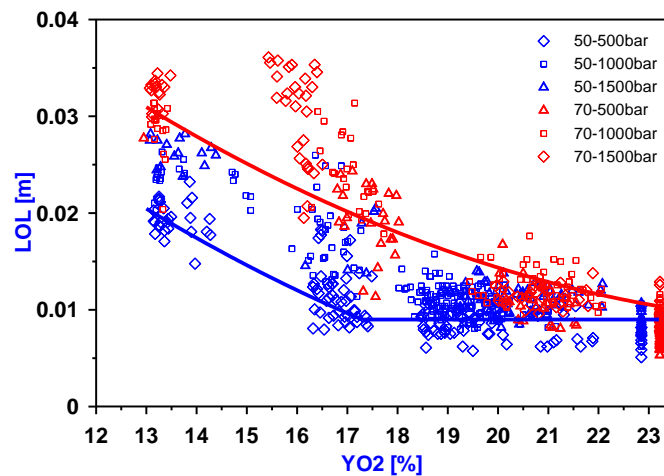


figure 5 : Évolution de LOL en fonction de  $YO_2$  pour les deux buses.

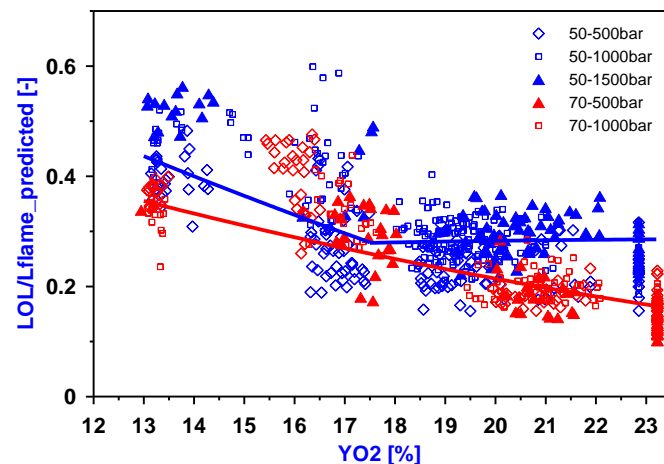


figure 6 : Évolution de  $LOL/L_{flame}$  en fonction de  $YO_2$  pour les deux buses.

## 5. RICHESSE AU LIFT-OFF

La richesse au lift-off dépend de la quantité d'oxygène entraîné dans le jet entre l'injecteur et le début de la flamme, c'est-à-dire de :

- la longueur du lift-off
- le taux d'entraînement des gaz dans le jet
- la concentration d'oxygène des gaz entraînés.

Le taux d'entraînement des gaz dépend principalement de la quantité de mouvement du jet et de la densité des gaz extérieurs, et donc de leur température. On peut faire deux hypothèses extrêmes pour évaluer cette température :

- Les gaz entraînés sont des gaz frais, non brûlés (hypothèse Sandia).
- Les gaz entraînés contiennent des gaz brûlés par la flamme toute proche. La température et la densité des gaz entraînés est la même avant et après le lift-off (hypothèse CMT).

La réalité est probablement variable en fonction des conditions d'essai, mais se trouve forcément entre ces deux hypothèses extrêmes.

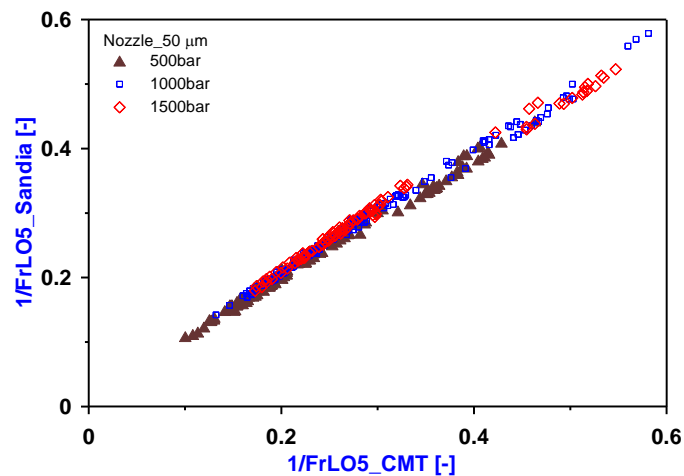


figure 7 : Comparaison des deux hypothèses de calcul de la richesse au lift-off.

La figure 7 montre que, quantitativement, les résultats obtenus avec les deux hypothèses utilisées sont très semblables. L'analyse a été faite en utilisant l'hypothèse CMT, plus facile à gérer.

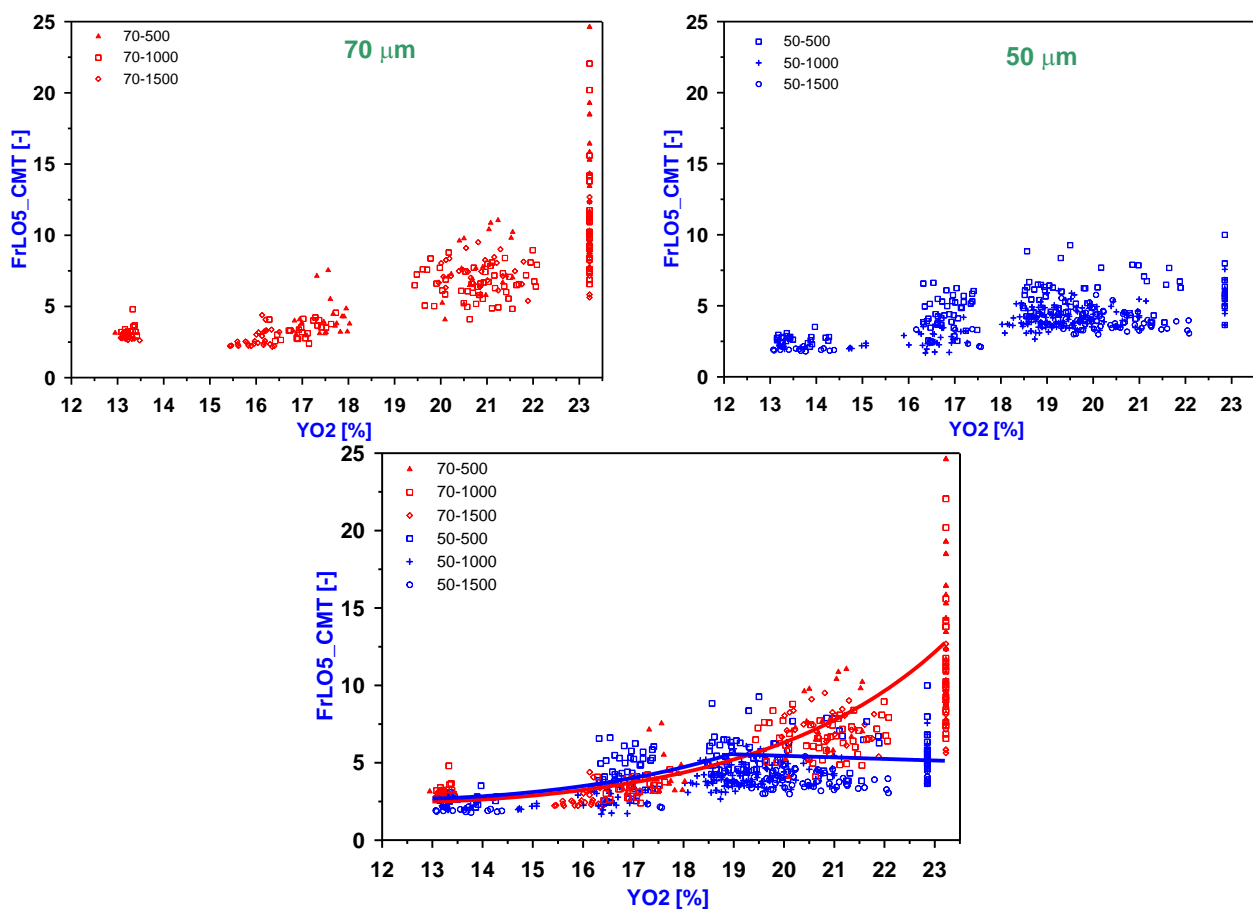


figure 8 : Richesse au lift-off en fonction de  $YO_2$  pour les deux buses.

Avec la buse de diamètre 70  $\mu\text{m}$ , le comportement du jet (longueur de mélange) et du lift-off font que la richesse du mélange air/carburant situé près de l'axe du jet, juste après le lift-off, augmente de façon monotone avec la concentration d'oxygène.



Avec la buse de 50  $\mu\text{m}$ , la richesse au lift-off commence à se comporter de manière similaire pour des concentrations massiques d'oxygène inférieures à 17-18%. Au delà, le blocage du lift-off sur un seuil aux environs de 10 mm de l'injecteur fait que la richesse au lift-off se stabilise et arrête d'augmenter.

## 6. FORMATION DE SUIES - $F_{\text{soot}}$

Les conséquences de ce seuil du lift-off sont clairement visibles sur les résultats de concentration de suies obtenus par quantification de l'intensité de radiation dans le spectre visible (550 nm). Que l'on

analyse le paramètre  $KL$  ( $I_{\text{soot}}(\lambda, T, KL) = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-KL}{\lambda^\alpha}\right) \right] \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{C_1}{\left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}$ ) ou le paramètre

$$F_{\text{soot}} \left( F_{\text{soot}} = \frac{\text{Concentration locale de suies}}{\text{Concentration locale de carburant non brûlé}} = \frac{KL_{\text{max}} \cdot L_{\text{flam}}}{\left( 1 + \frac{3.36}{YO_2} \right) \cdot \phi_o^2} \right), \text{ on observe que les}$$

suies de la buse  $\phi$  70  $\mu\text{m}$  augmentent de façon monotone avec la concentration d'oxygène (figure 9).

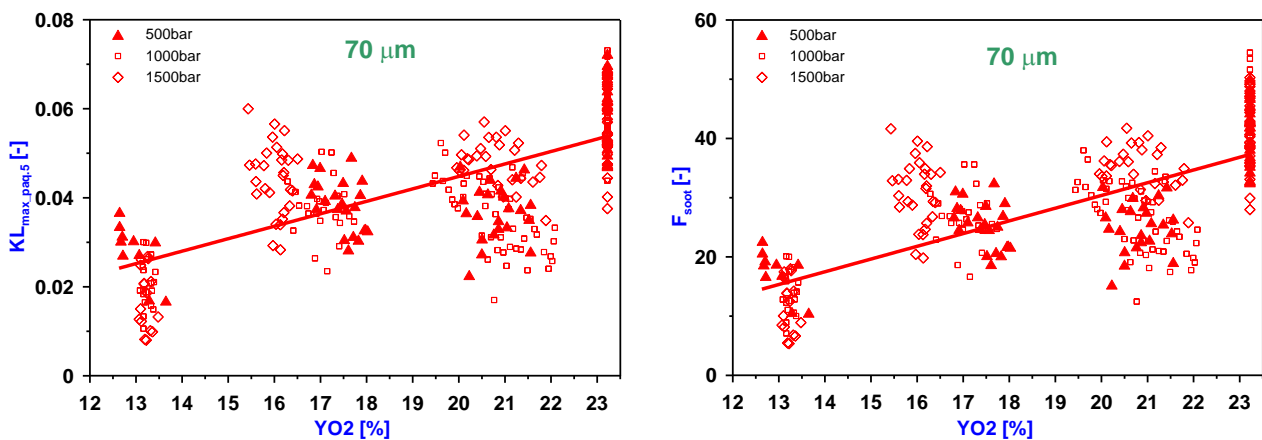


figure 9 :  $KL$  et  $F_{\text{soot}}$  en fonction de  $YO_2$  pour la buse 70  $\mu\text{m}$ .

Au contraire, pour la buse  $\phi$  50  $\mu\text{m}$ , cette tendance s'achève vers une concentration d'oxygène de l'ordre de 17-18%. A partir de ce point et jusqu'à une concentration atmosphérique (23%), la conséquence de la présence du seuil de lift-off est la stabilisation puis la chute de la formation de suies.

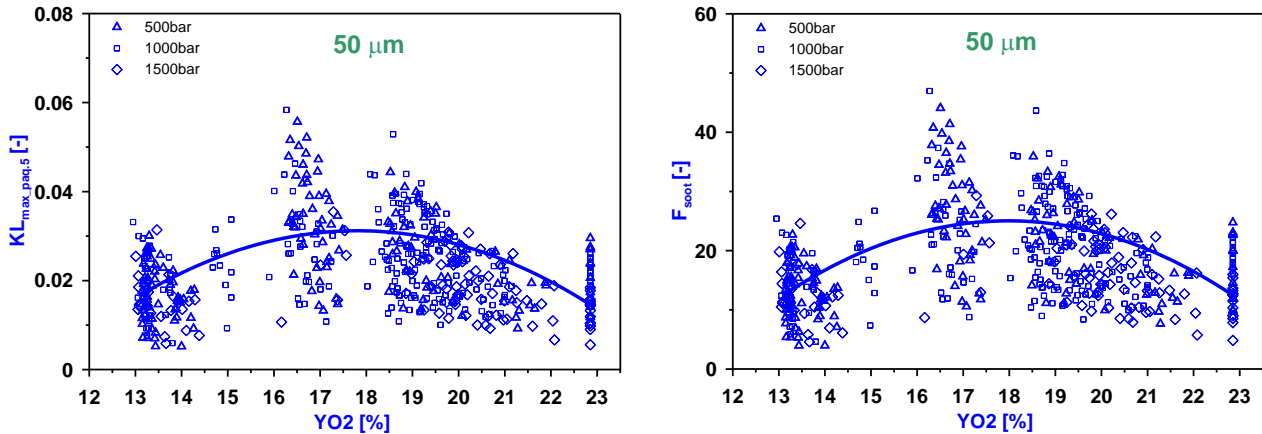


figure 10 :  $KL$  et  $F_{soot}$  en fonction de  $YO_2$  pour la buse 50  $\mu m$ .

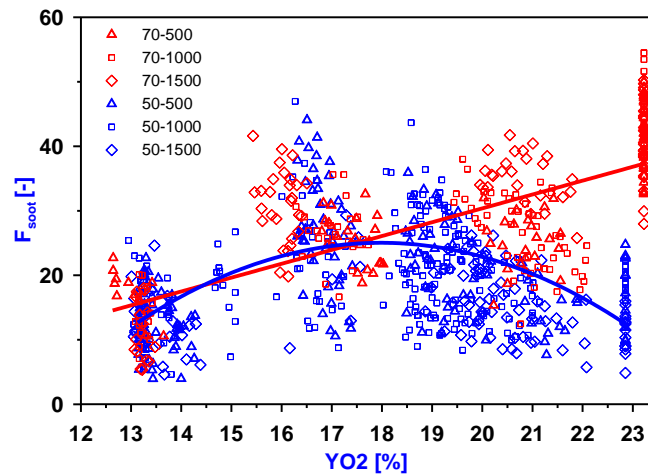


figure 11 :  $F_{soot}$  en fonction de  $YO_2$  pour les deux buses.

La chronologie des essais (balayage de  $YO_2$  pour chacune des 3 pressions d'injection successivement) confirme que le comportement du processus de formation de suies de la buse  $\varnothing$  50  $\mu m$  n'est pas dû à un problème expérimental (encrassement des accès optiques, dérive de la caméra, dérive des conditions dans le cylindre...).

## 7. SYNTHESE

La figure 12 montre clairement les conséquences de la stabilisation de la richesse au lift-off de la buse  $\varnothing$  50  $\mu m$  (pour  $YO_2 > 17-18\%$ ) sur l'intensité du processus de formation de suies représentée par le paramètre  $F_{soot}$ .

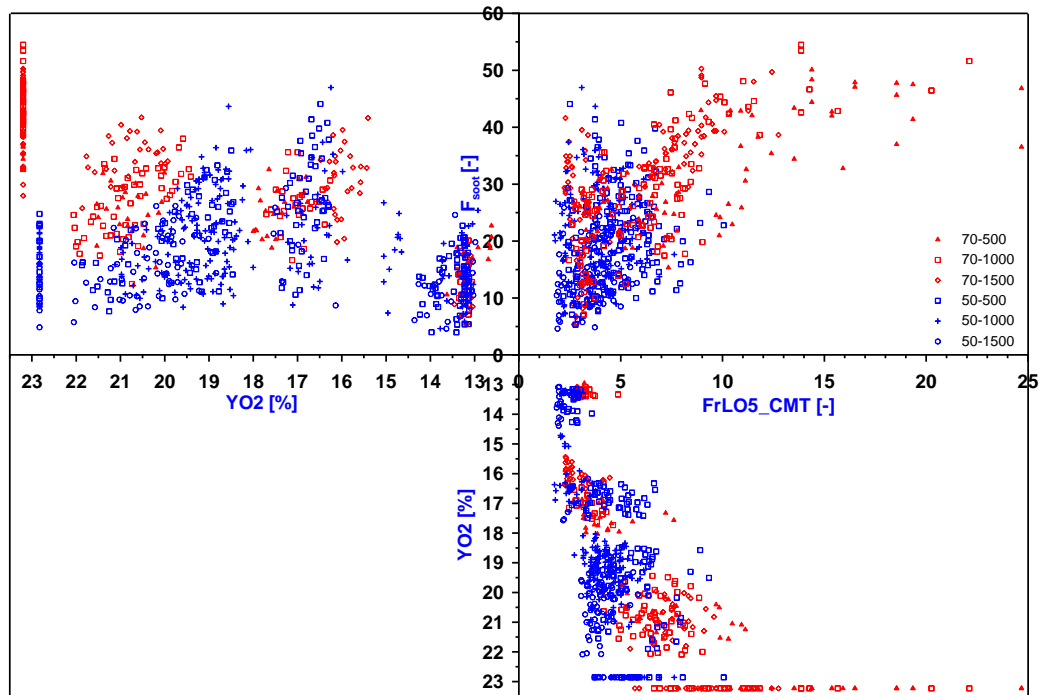


figure 12 : Vue globale de l'intensité du processus de formation de suies.

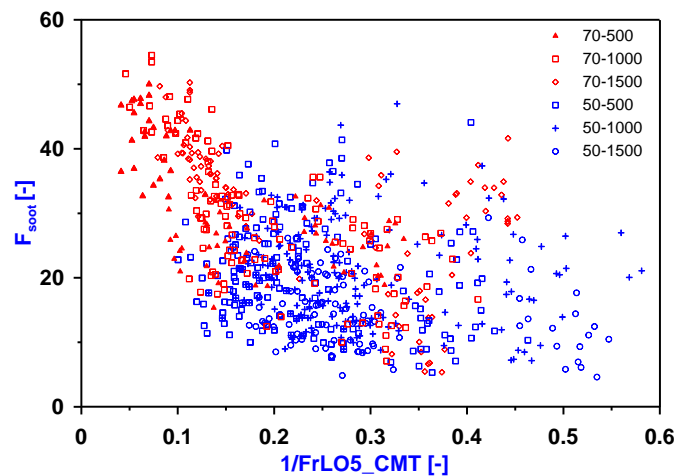


figure 13 : Fsoot en fonction de l'inverse de la richesse pour les deux buses.

Globalement il est clair que la buse  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  permet de réduire significativement le processus de formation de suies par rapport à la buse  $\varnothing 70 \mu\text{m}$ . Cependant, et malgré la forte dispersion des résultats obtenus, l'analyse plus détaillée permet d'entrevoir des conclusions importantes :

### 7.1. CONCLUSION 1

Pour un diamètre donné, l'amélioration du processus de mélange (modification de la géométrie de l'orifice...) semble affecter de manière similaire ( $\propto \varnothing^{1/2}$  dans notre cas) la longueur de mélange et

la longueur de lift-off. La conséquence est un ratio  $\frac{LOL}{L_{flam}}$  inchangé et donc, a priori, pas de variation importante dans la formation de précurseurs de suies.

## 7.2. CONCLUSION 2

Dans la configuration de cette étude, il semble qu'il y ait un seuil à environ 10 mm de l'injecteur, à partir duquel la longueur de lift-off ne se réduit plus. Avec la buse  $\varnothing 70 \mu\text{m}$  on s'approche de ce seuil pour les valeurs de concentration d'oxygène les plus élevées (sans EGR). Avec la buse  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  on arrive à ce seuil pour  $YO_2 > 17-18\%$ . On ne peut que faire des hypothèses pour expliquer l'origine de ce seuil :

- Effets dû aux processus d'atomisation et d'évaporation ?
- Effets dû à la proximité de la paroi froide ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ) de la culasse ?

En tout cas, il est peu probable que la position de ce seuil ( $\sim 10$  mm de l'injecteur) et ses conséquences soient directement extrapolables à une configuration réelle avec une buse multitrous.

Les résultats exposés montrent que la présence de ce seuil affecte fortement la quantité d'oxygène entraînée dans le jet avant le lift-off et, par conséquent, le processus de formation de suies.

## 7.3. CONCLUSION 3

Expérimentalement il est clair (pour nos essais comme pour ceux de la bibliographie) que, sans EGR ( $YO_2 = 23\%$ ), la réduction du diamètre de la buse se traduit par une réduction significative de la formation de suies.

Les résultats présentés semblent montrer que ce comportement n'est pas forcément extrapolable à des conditions avec fort EGR. En effet, lorsque la longueur de lift-off est supérieure au seuil (taux d'EGR élevé et/ou  $\varnothing$  plus élevés), l'influence du diamètre de la buse sur le processus de formation de suies semble beaucoup plus réduite. La forte dépendance du diamètre observée sans EGR semble surtout due à la présence du seuil de lift-off.

Il est d'ailleurs possible que la position de ce seuil, probablement variable en fonction de la configuration expérimentale, soit à l'origine de la forte dispersion des résultats de l'influence du diamètre des orifices sur la longueur de lift-off et le processus de formation de suies présents dans la bibliographie.

# 8. CONSEQUENCES PRATIQUES

## 8.1. CONSEQUENCE PRATIQUE 1

L'intérêt d'utiliser de très faibles diamètres de buse afin de réduire la formation de suies, connu et validé sans EGR, ne semble pas évident pour des conditions d'EGR élevé.

## 8.2. CONSEQUENCE PRATIQUE 2

Même si ces résultats obtenus pour des buses monotrou axial ne sont probablement pas extrapolables directement à des buses multitrous radiaux, l'influence de la position du seuil de lift-off paraît claire. Il semble intéressant d'étudier le comportement de ce seuil pour des buses réelles



ainsi que les voies possibles pour l'éloigner de l'injecteur et ainsi potentiellement réduire la formation de suies.