

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et**

### **discussion**

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### IV.1.Introduction

Les résultats numériques présentés dans ce chapitre ont été obtenus à l'aide du code commercial Fluent version 6.3 basé sur la méthode numérique des volumes finis, cette méthode est bien exposée dans le chapitre III. Ces résultats obtenus de la simulation numérique d'un écoulement turbulent avec réaction chimique et une comparaison de ces résultats numériques avec les résultats expérimentaux existant dans la littérature.

Le code "Fluent" a été utilisé pour simuler la combustion dans la chambre de combustion d'un moteur à allumage commandé, avec les caractéristiques suivantes :

La distance entre le PMH et le PMB, qui correspond à la course H, est donc de 50mm.

L'alésage (diamètre est de 50 mm. La surface de la base du cylindre, considérée comme circulaire, est  $S = \pi r^2$  avec  $r = \text{alésage}/2$ . Le volume du cylindre est  $V = S \times \text{course}$  soit  $=19.625 \times 5 = 98.125 \text{ cm}^3$ .

On utilise le le modèle PDF (conserved scalar PDF model) , basé sur la fonction densité de probabilité, avec un seul carburant et un seul oxydant, non- pré mélange et on suppose que l'équilibre chimique est instantané. Nous avons défini un carburant qui contient CH<sub>4</sub> ( 98 %),C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (9.2 %), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (0.37 %), C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (0.28 %) et CO<sub>2</sub> (1.1 %), l'oxydant O<sub>2</sub> (21.008%), ainsi que les produits de la réaction (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), sans oublier le diazote N<sub>2</sub>, constituant principal de l'air. La pression du système est d'un bar et la température de 315 K. On fait entrer par deux lumières d'admission adjacentes le carburant et par les deux autres l'air (oxygène + azote), à la vitesse de 10 m/s pour le carburant et en variant la vitesse de l'air (10, 20 et 30m/s) , pour voir l'effet de comburant sur la combustion.

### IV.2.Validation des résultats

Pour pouvoir comparer quantitativement le calcul numérique avec les expériences, des coupes ont été réalisées dans les champs de vitesses. La figure (IV.1) montre les comparaisons entre les calculs numériques et les mesures effectuées par Lartigue et Poinso [15]. La comparaison est globalement satisfaisante pour les trois composantes de la vitesse à  $x = 1.5 \text{ mm}$ ,  $5 \text{ mm}$  et  $15 \text{ mm}$ .

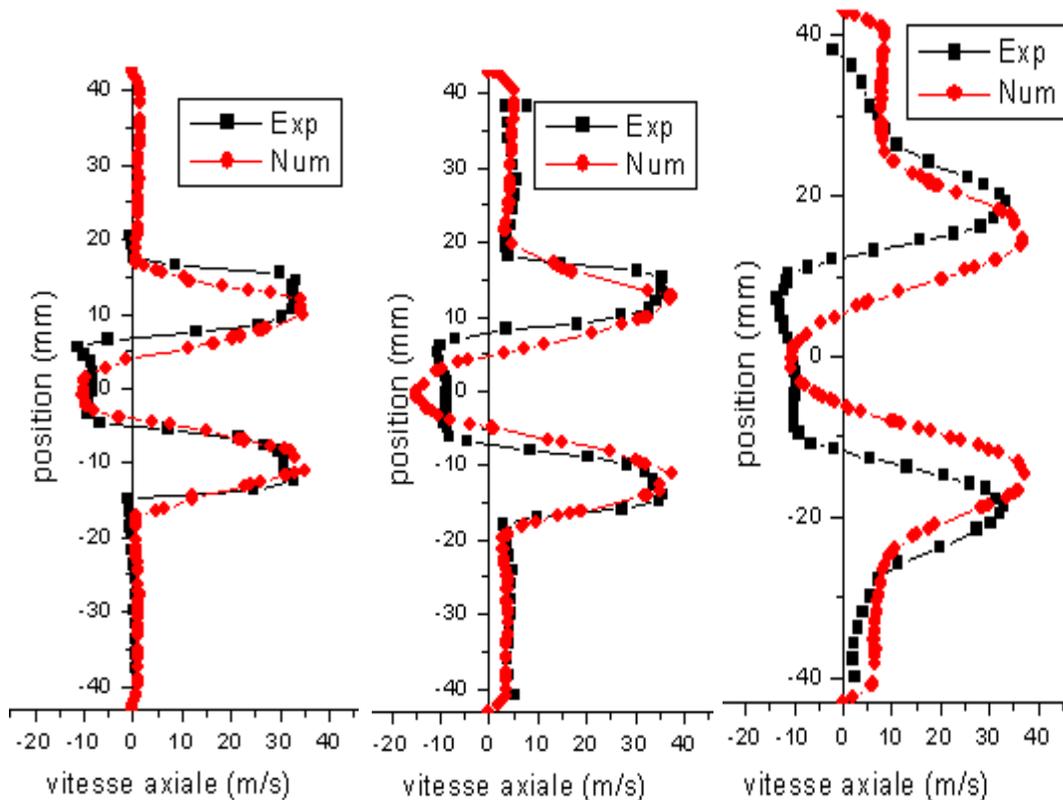


Figure IV.1 : coupe des valeurs moyennes de la vitesse axiale.

### IV.3.Champ de température

Nos simulations numériques ont été présentées pour différentes valeurs de la vitesse d'injection de l'air à l'entrée de ( $V_{\text{air}}=10, 20, 30\text{ m/s}$ ) et différentes valeurs de la vitesse d'injection de carburant à l'entrée de ( $V_{\text{carburant}}=10, 20, 30\text{ m/s}$ ). Nous présentons leurs effets sur le champ de température, le champ de vitesse, les différentes fractions massiques et enfin la production de NOx

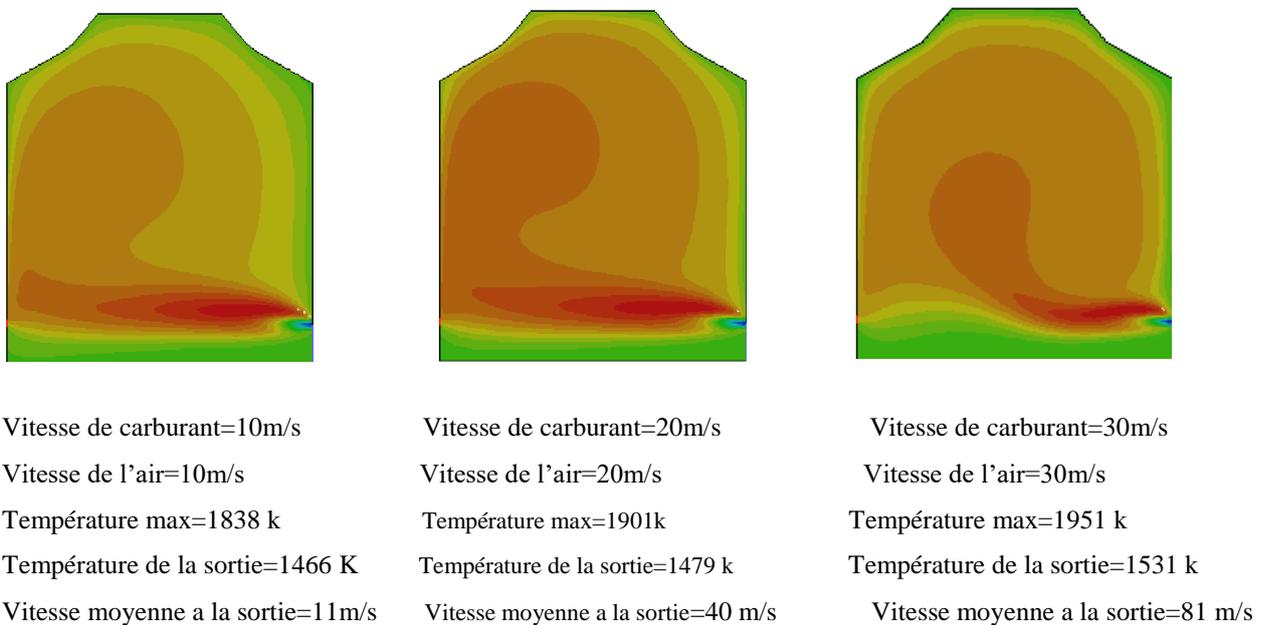
La température augmente de façon régulière jusqu'à l'échappement, pour laquelle la température atteint sa valeur maximale (appelée longueur de flamme) et qui se trouve dans la zone pas loin de l'entrée. Ensuite, la température diminue progressivement suivant l'axe du jet et sur la hauteur. On a remarqué dans le cas où la vitesse à l'entrée de carburant=  $10\text{ m/s}$  ; l'air= $10\text{ m/s}$ , que la température maximum atteint  $T_{\text{max}} = 1838\text{ k}$  ; la température moyenne à sortie vaut  $T_{\text{moy}} = 1466\text{ k}$ , et la vitesse moyenne à la sortie égale  $V_{\text{moy}} = 11\text{ m/s}$ , donc on remarque qu'il y a une augmentation dans la vitesse par rapport à l'entrée, probablement à cause de la l'augmentation de la pression.

Dans le cas où la vitesse à l'entrée de carburant=20 m /s ; l'air =20 m/s, la température maximum atteint  $T_{\max} = 1901\text{K}$  ; la température moyenne à la sortie vaut  $T_{\text{moy}} = 1479\text{ K}$ , et la vitesse moyenne à la sortie égale  $V_{\text{moy}} = 40\text{m/s}$ .

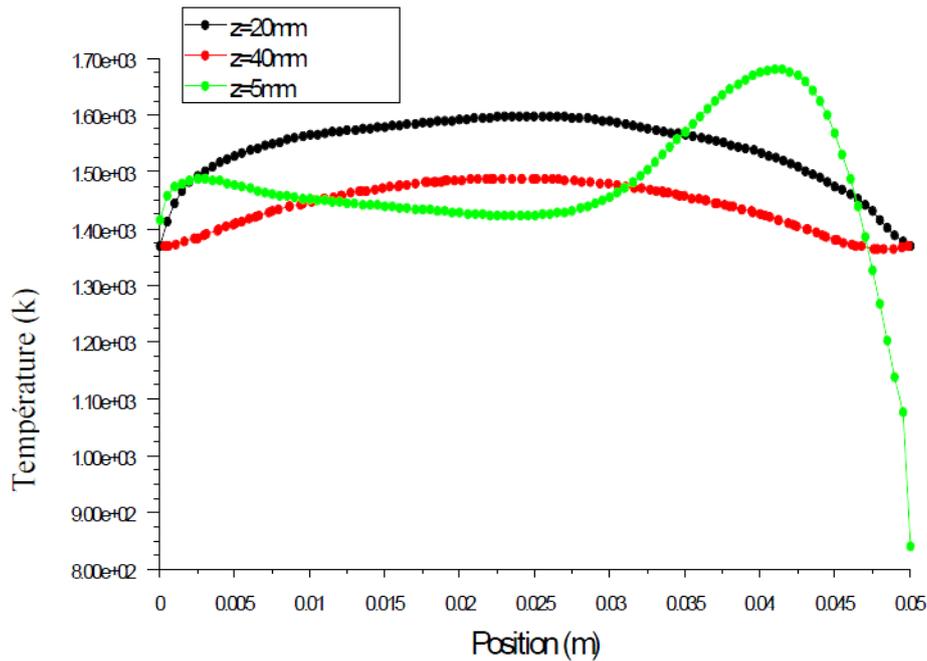
Dans le cas où la vitesse à l'entrée de carburant=30 m /s ; l'air =30 m/s, la température maximum atteint  $T_{\max} = 1951\text{K}$  ; la température moyenne à la sortie vaut  $T_{\text{moy}} = 1531\text{ K}$ , et la vitesse moyenne à la sortie égale  $V_{\text{moy}} = 81\text{m/s}$ . On observe qu'augmentation de la vitesse de l'entrée de l'air et le carburant, provoque une augmentation légère dans la température maximum et la température moyenne à sortie, mais la vitesse moyenne à sortie augmente brusquement.

La variation de la température suivant la direction radiale est montrée sur figure (IV.3), sous forme de profil radial aux différentes positions (à  $y=5\text{mm}$ ,  $20\text{mm}$  et  $40\text{mm}$ ), en remarquant que sur l'axe du jet et pas loin de la lumière d'injection la température atteinte sa valeur maximum.

Dans le tableau (IV.1) sont regroupées les différentes valeurs obtenues de la Température maximum ; la température à la sortie et la vitesse à la sortie, en observant une croissance monotone de la température avec la vitesse d'injection de carburant et de comburant.



**Figure IV.2** : Contour de la température totale pour différentes valeurs de vitesse de carburant et de l'air.



**Figure IV.3** : Profil de la température à  $z=5\text{mm}$ ,  $20\text{mm}$  et  $40\text{mm}$  : Vitesse carburant=  $10\text{ m/s}$  ; vitesse de l'air =  $10\text{ m/s}$ .

**Tableau IV.1** La température maximum, température à la sortie et vitesse à la sortie (m/s)

	Température maximum (k)	Température à la sortie (k)	Vitesse à la sortie (m/s)
$V_{\text{car}}=V_{\text{air}}=10(\text{m/s})$	1838	1466	11
$V_{\text{car}}=V_{\text{air}}=20(\text{m/s})$	1901	1479	40
$V_{\text{car}}=V_{\text{air}}=30(\text{m/s})$	1951	1531	81

#### IV.4.Champ dynamique

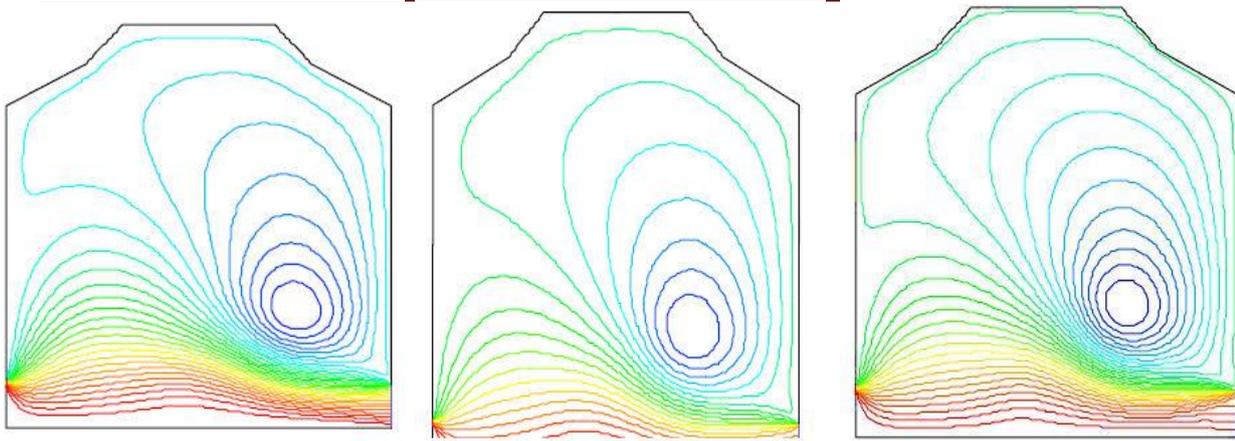
Les résultats qui sont présentés ici montre l'effet de la vitesse d'injection de comburant (air) sur le champ d'écoulement, en variant la vitesse  $V_{\text{air}}$  (10, 20 et  $30\text{m/s}$ ) et en fixant la vitesse de carburant,  $V_{\text{carburant}}$  ( $10\text{m/s}$ ). La figure (IV.4) montre les iso-contours de la fonction de courant. On observe d'abord, deux zones de recirculation avec une ligne séparatrice pratiquement nulle. La figure (IV.4) montre que les unes augmentation de débit avec l'augmentation de la vitesse d'injection de l'air. Dans le cas  $V_{\text{air}}=10\text{m/s}$ , on a  $\psi_{\text{max}}=0.0053$  (kg/s), pour le cas de  $V_{\text{air}}=20\text{m/s}$  on a  $\psi_{\text{max}}=0.0293$  (kg/s), dans le cas  $V_{\text{air}}=30\text{m/s}$  on a  $\psi_{\text{max}}=0.0392$  (kg/s). On n'observe également que les zones proches des coins de la chambre sont des zones mortes où la vitesse est relativement faible. Elles sont dues à l'élargissement brusque de la chambre. Du fait de la dilatation des gaz et le

rétrécissement de section dans la chambre de combustion, les contours de la composante axiale indiquent que le débit volumique à la sortie est bien supérieur à celui à l'entrée.

Les profils radiaux pour différentes vitesses d'injection de l'air, de la composante axiale de la vitesse, sont montrés sur la figure (IV.5), il est clair que la vitesse axiale dans le cas  $v_{air}=30\text{m/s}$  est plus élevée que celle de  $V_{air}=10$  et  $20\text{m/s}$ .

Les profils axiaux pour différentes vitesses d'injection de l'air, de la composante radiale de la vitesse, sont montrés sur la figure (IV.6), cette composante est nulle sur la partie centrale pour les faibles vitesses ( $V_{air}=10$  et  $20\text{m/s}$ ) mais pour  $V_{air}=30$ , les valeurs de la vitesse deviennent négative signifiant la convergence du fluide vers le centre. Puisque le solveur fluent résout les équations par rapport au système cartésien, la composante de vitesse radiale apparaît avoir le signe opposé au-dessus et en dessous de l'axe de la géométrie. Cela est imposé par le principe de la conservation de masse étant donné que dans le centre du jet la vitesse radiale diminue.

La figure (IV.7) illustrent l'évolution, le long de l'axe du jet, de l'énergie cinétique, dans le cas où la vitesse à l'entrée de carburant  $=10\text{ m/s}$  ; vitesse de l'air  $=10, 20$  et  $30\text{ m/s}$ . La similitude entre les comportements de  $k$  et  $\varepsilon$  peut s'expliquer par le fait que là où il y a une turbulence intense dans le jet, il y a aussi un taux de dissipation important. L'allure du profil du taux de dissipation  $\varepsilon$  donné à l'entrée est très similaire à celle de l'énergie turbulente, cela est plutôt prévisible du fait que l'expression donnant  $\varepsilon$  à l'entrée est basée sur la supposition de l'état d'équilibre local de la turbulence, qui montre que  $\varepsilon$  est proportionnel à  $K^{\frac{3}{2}}$ . Lors de la décroissance de l'énergie cinétique, qui tend vers 0 à l'infini, il est clair que sur l'axe, le gradient de la vitesse moyenne est nul. On observe aussi que les valeurs de  $\varepsilon$  et  $k$  augmentent avec l'augmentation de la vitesse à l'entrée de l'air ( $V_{air}$ ) et atteignent la valeur maximum au  $z=30\text{ mm}$ .



Vitesse de carburant=10m/s

Vitesse de l'air=10m/s

$\psi_{max}=0.0053$  (kg/s)

Vitesse de carburant=10m/s

Vitesse de l'air=20m/s

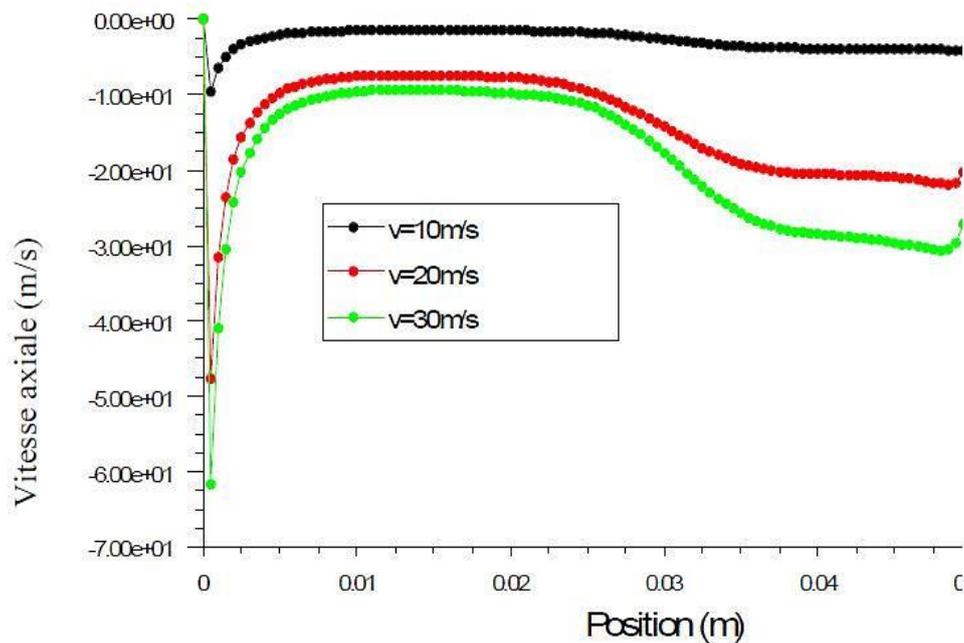
$\psi_{max}=0.0293$  (kg/s)

Vitesse de carburant=10m/s

Vitesse de l'air=30m/s

$\psi_{max}=0.0392$  (kg/s)

**Figure IV.4 :** Iso- contours de la fonction de courant,  $\psi$  dans le cas  $V_{air}=10m/s$  et  $V_{carburant}=10,20$  et  $30$  m/s.



**Figure IV.5 :** Profil radial de la composante axiale de la vitesse à  $z=25mm$ .

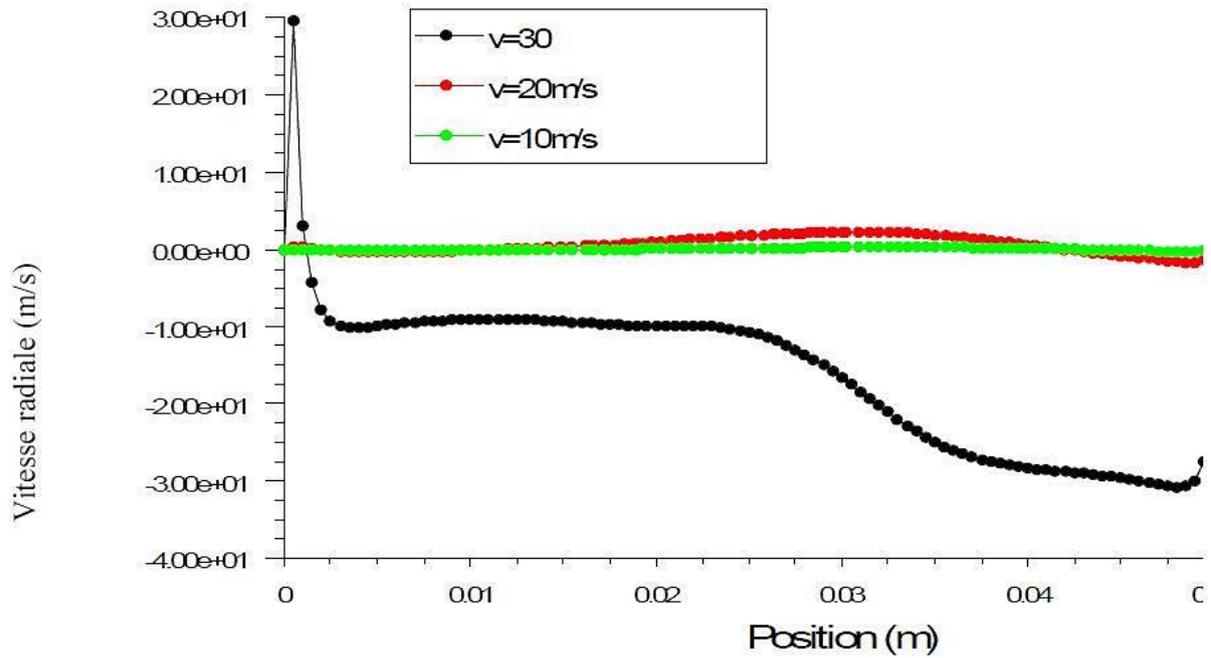


Figure IV.6 : Profil axial de la composante radiale de la vitesse à  $r=25\text{mm}$ .

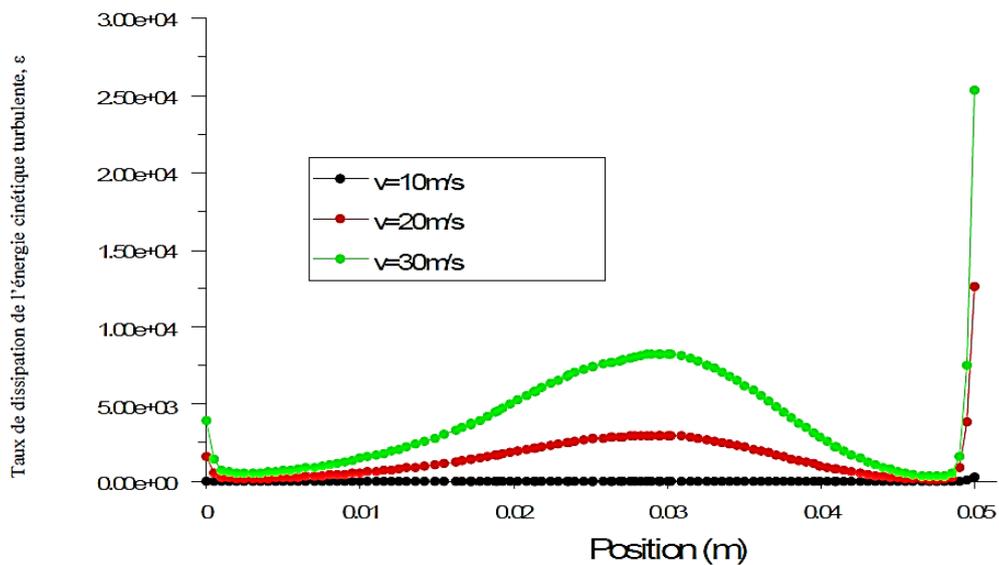


Figure IV.7 : Profil axial du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente,  $\epsilon$  ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) à  $r=25\text{mm}$ .

## IV.5. Fractions massiques

On utilise le modèle PDF (conserved scalar PDF model), basé sur la fonction densité de probabilité, avec un seul carburant et un seul oxydant, non- prémélangé et on suppose que l'équilibre chimique est instantané. Nous avons défini un carburant qui contient CH<sub>4</sub> ( 98 %), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (9.2 %), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (0.37 %), C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (0.28 %) et CO<sub>2</sub> (1.1 %), l'oxydant O<sub>2</sub> (21.008 %), ainsi que les produits de la réaction (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), sans oublier le diazote N<sub>2</sub>, constituant principal de l'air (Tableau IV.2).

**Tableau IV.2 :** différents constituant de carburant et oxydant.

Species	Mass Fraction	Mole Fraction
o2	0	0.21008
co2	0.00111	0
c2h6	0.00922	0
c3h8	0.00037	0
c4h10	0.00028	0
ch4	0.98144	0

Species Unit:  Mass Fraction,  Mole Fraction

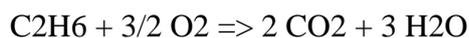
Temperature: Fuel (k) 315, Oxid (k) 315

Boundary Species: [ ]

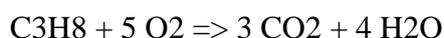
List Available Species

La pression du système est d'un bar et la température de 315 K. On fait entrer par deux lumières d'admission adjacentes le carburant et par les deux autres l'air (oxygène + azote), à la vitesse de 10 m/s pour le carburant et en variant la vitesse de l'air (10, 20 et 30m/s), pour voir l'effet de comburant sur la combustion.

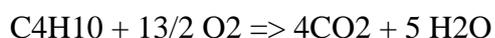
La réaction de combustion du C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> avec O<sub>2</sub> est la suivante :



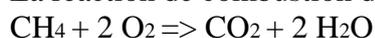
La réaction de combustion du C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> avec O<sub>2</sub> est la suivante :



La réaction de combustion du C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> avec O<sub>2</sub> est la suivante :



La réaction de combustion du CH<sub>4</sub> avec O<sub>2</sub> est la suivante :



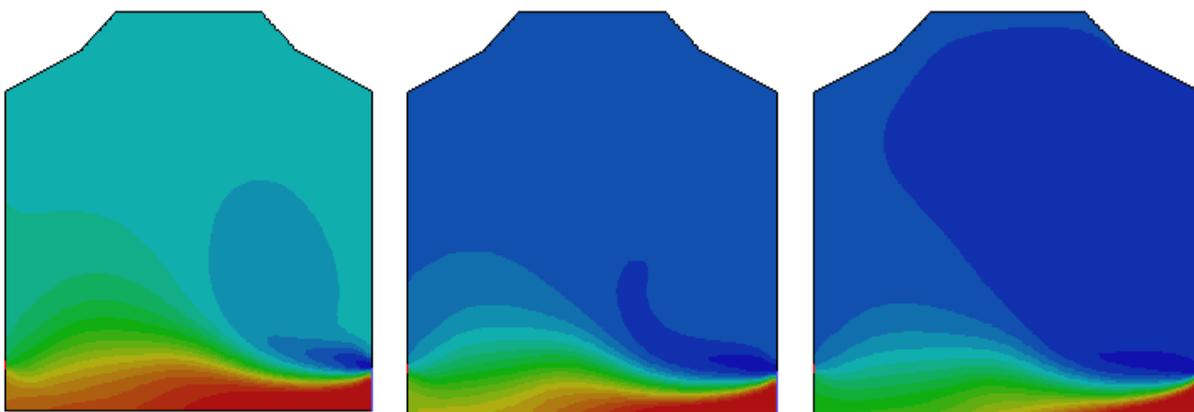
Sur la figure (IV.8), on voit que le carburant entre d'un côté et l'oxygène de l'autre. On remarque que l'azote est introduit avec l'oxygène et qu'il est diffusé dans la chambre, tandis que l'oxygène disparaît au fur et à mesure de sa combustion. De monoxyde de carbone (CO) est formé.

En sortie le fait que nous ayons beaucoup plus de CO que de CO<sub>2</sub> signifie que la réaction est trop pauvre en oxygène.

Nous observons que là où la concentration de propane est pauvre, nous avons l'apparition des autres espèces chimiques formées.

#### IV.5.1. La fraction massique du CH<sub>4</sub>

La fraction massique diminue progressivement de la valeur initiale (à l'entrée) pour disparaître complètement à la fin de la zone de réaction. La consommation de CH<sub>4</sub> est clairement illustrée sur la figure (IV.8). En effet, la fraction massique totale de CH<sub>4</sub> est stable et atteint 0.96. La fraction à la sortie diminue si en change dans le débit de l'oxygène. Donc la variation de débit d'oxygène a un effet significatif sur la fraction massique de CH<sub>4</sub> (tableau IV.3). près de la sortie dans le cas  $V_{air} = 30$  m/s, la fraction massique vaut à 0.26.



Vitesse de carburant=10m/s

Vitesse de carburant=10m/s

Vitesse de carburant=10m/s

Vitesse de l'air=10m/s

Vitesse de l'air=20m/s

Vitesse de l'air=30m/s

Fraction massique de CH<sub>4</sub>=0.96

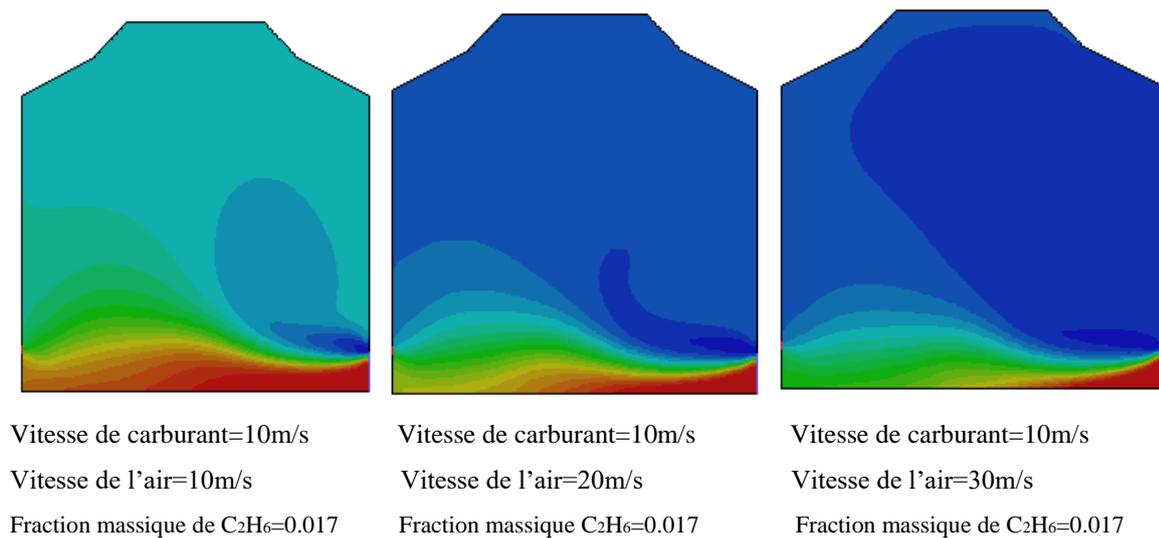
Fraction massique de CH<sub>4</sub>=0.96

Fraction massique de CH<sub>4</sub>=0.96

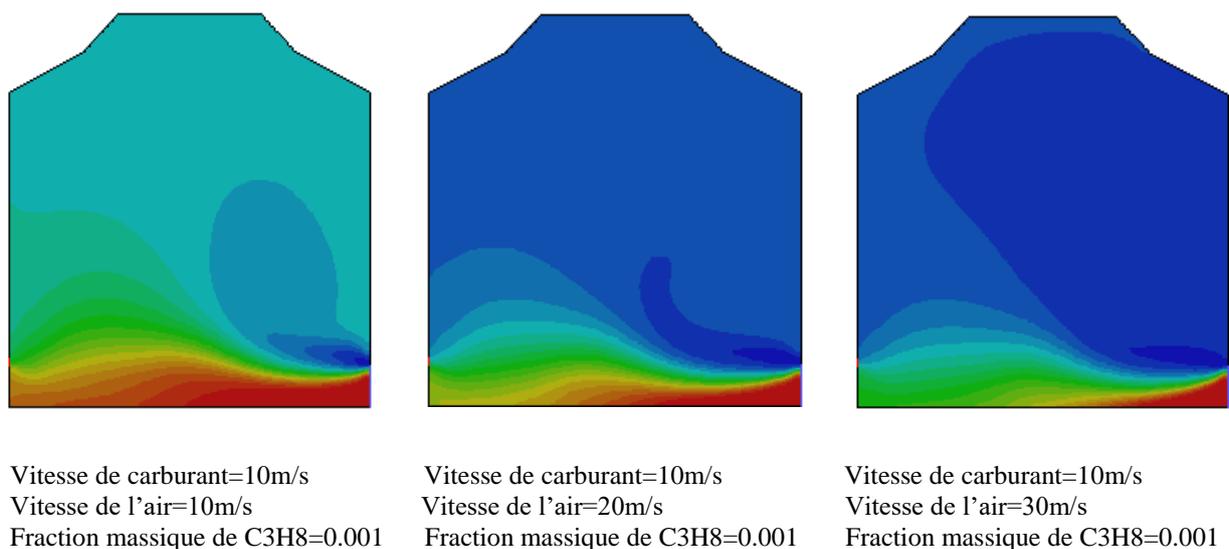
**Figure IV.8:**Contour de la fraction massique de CH<sub>4</sub>.

### IV.5.2. La fraction massique de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

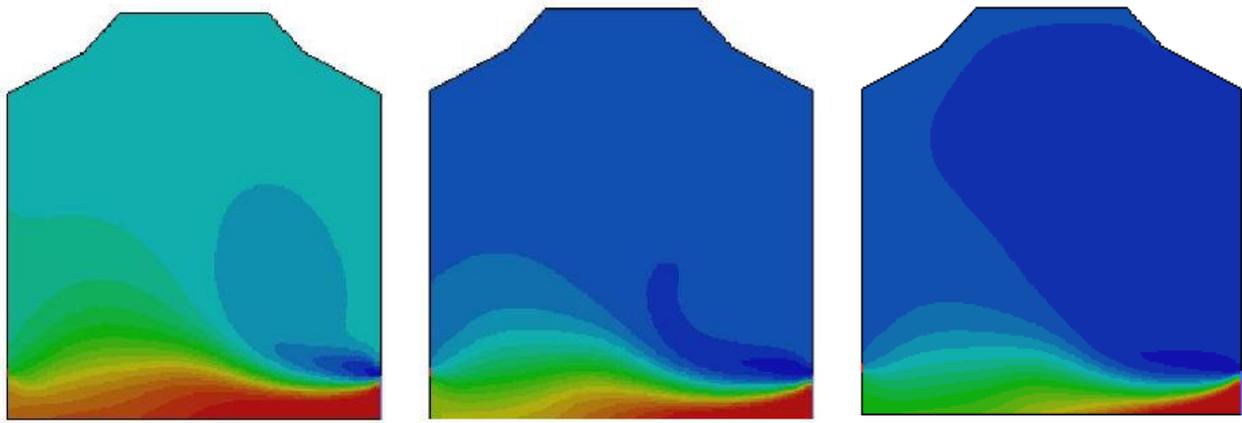
Les contours de la fraction massique de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> illustrés les figures (IV. 9-11) montrent que la valeur de la fraction totale au niveau de la chambre est pratiquement stable. En effet, La fraction massique diminue progressivement de la valeur initiale pour disparaître complètement à la fin de la zone de réaction. La fraction massique totale de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> est stable et atteint 0.017. La fraction à la sortie diminue si en change dans le débit de l'oxygène. En avançant de part et d'autre vers le front de flamme, les taux de réaction augmentent puisque les fractions massiques des espèces des gaz frais et brûlés sont non nulles.



**Figure IV.9:**Contour de la fraction massique de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>.



**Figure IV.10:**Contour de la fraction massique de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>



Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=10m/s  
Fraction massique de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>=0.001

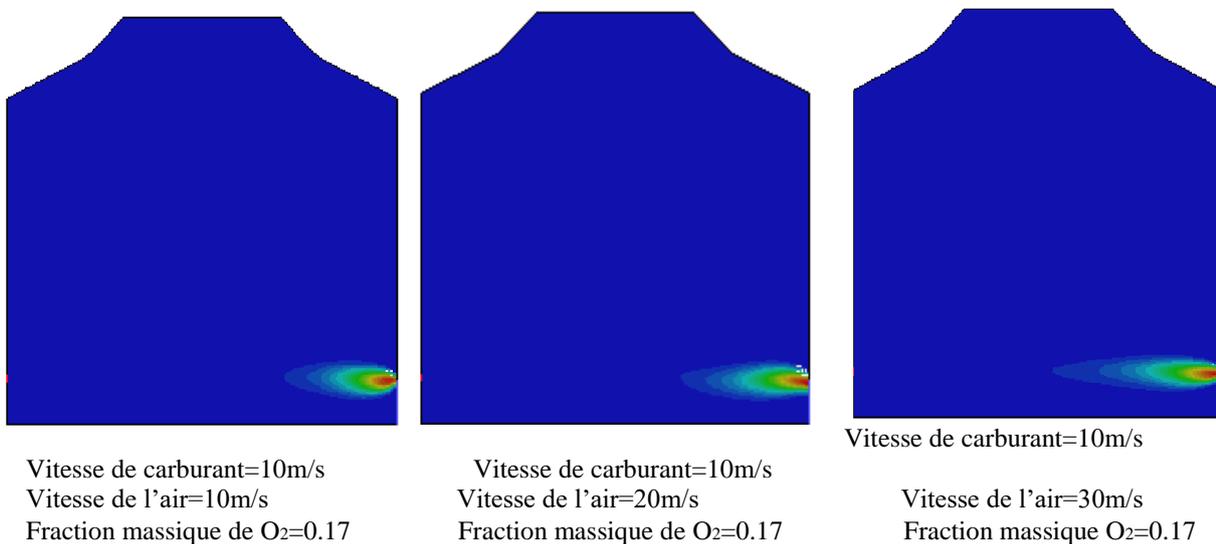
Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=20m/s  
Fraction massique de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>=0.001

Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=30m/s  
Fraction massique de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>=0.001

**Figure IV.11:**Contour de la fraction massique de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>.

### IV.5.3.La fraction massique de O<sub>2</sub>

La fraction massique de O<sub>2</sub> à l'entrée égale 0.17, mais à l'échappement est totalement nulle sauf dans le cas  $V_{air} = 30\text{m/s}$ , ou il ya un excès d'air puisque la combustion est non stoechiométrique (Figure IV.12). Par contre, on remarque qu'il reste un peu d'O<sub>2</sub> à l'intérieur de la chambre de combustion.



Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=10m/s  
Fraction massique de O<sub>2</sub>=0.17

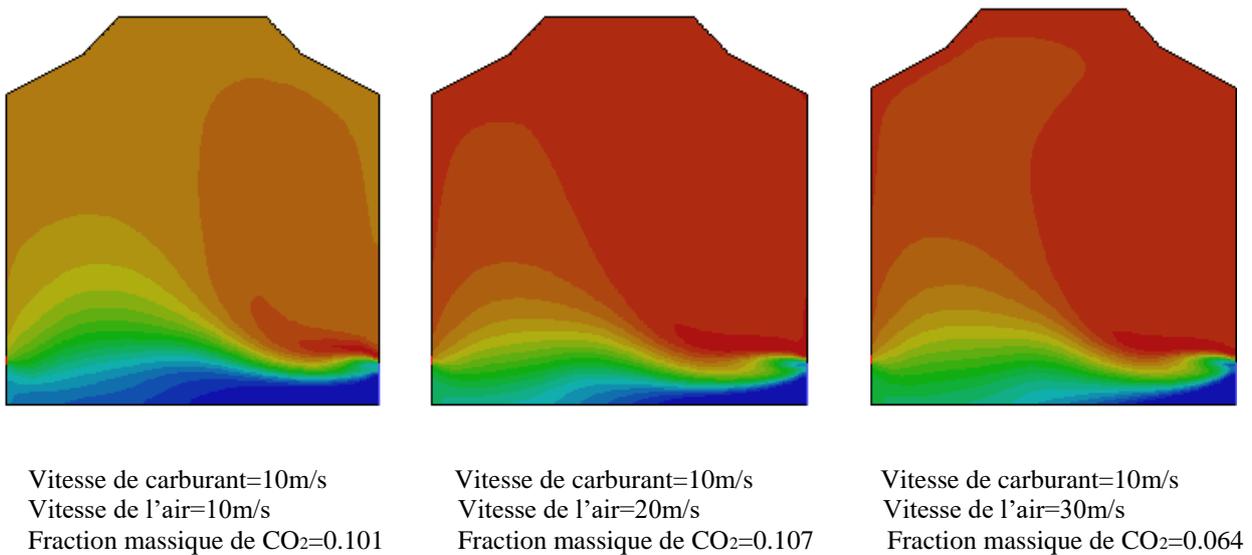
Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=20m/s  
Fraction massique de O<sub>2</sub>=0.17

Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=30m/s  
Fraction massique O<sub>2</sub>=0.17

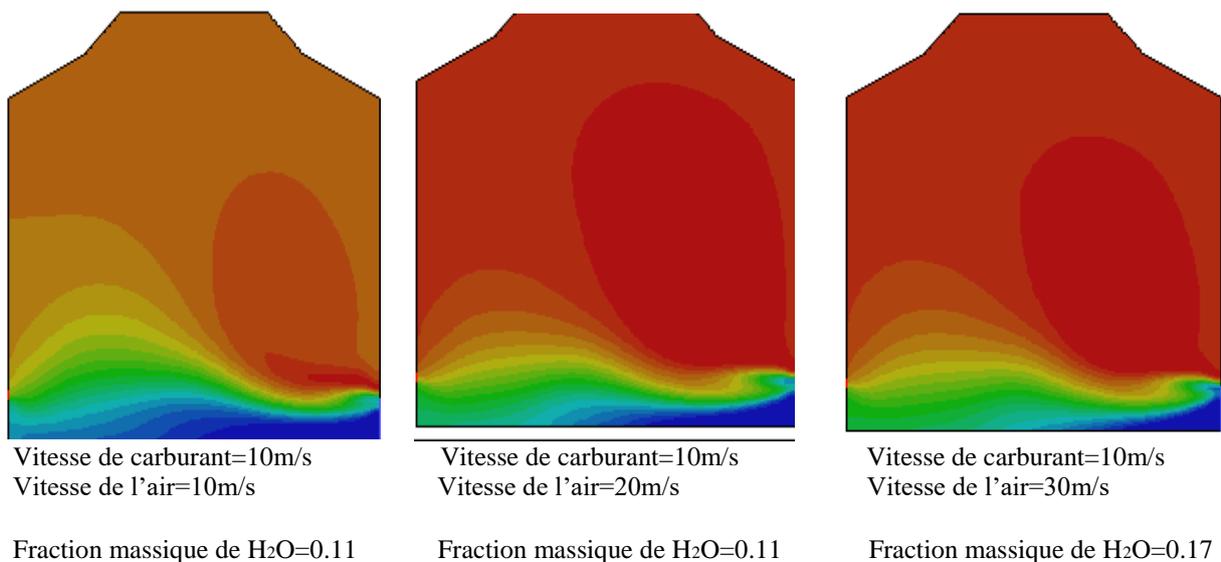
**Figure IV.12:**Contour de la fraction massique de O<sub>2</sub>.

#### IV.5.4. La fraction massique de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et CO

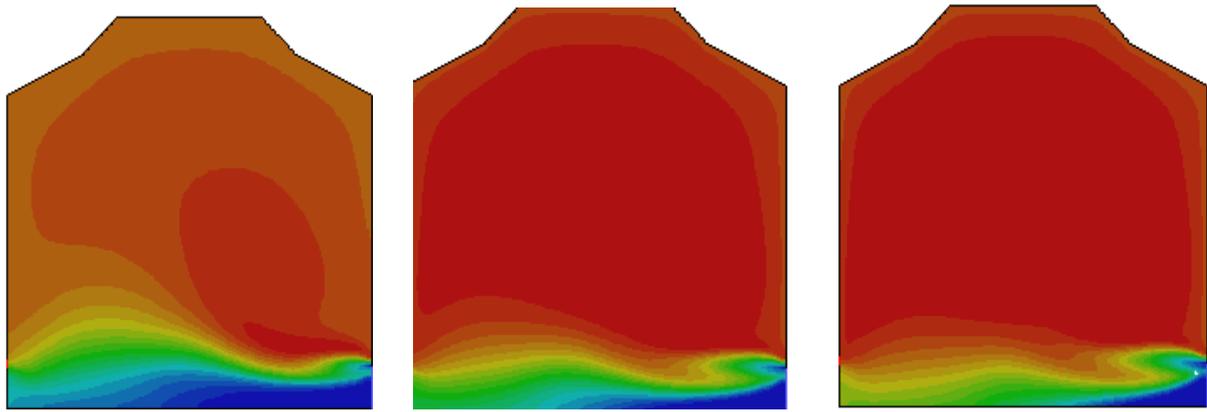
Les produits de combustion, inexistant dans le mélange, vont progressivement apparaître et augmenter pour atteindre des valeurs maximales dans la zone de réaction, pour le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'eau (H<sub>2</sub>O) et pour CO voir les figures (IV.13-15). On notera le comportement similaire de ces fractions. La concentration de ces espèces augmente à l'échappement. On note aussi que la fraction moyenne à la sortie de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et CO dans le cas  $V_{\text{Carburant}}=10 \text{ m/s}$  et  $V_{\text{air}}=10 \text{ m/s}$  atteintes 0.05 et 0.057, 0.019 respectivement.



**Figure IV.13:**Contour de la fraction massique de CO<sub>2</sub>



**Figure IV.14:**Contour de la fraction massique de H<sub>2</sub>O.



Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=10m/s  
Fraction massique de CO=0.030

Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=20m/s  
Fraction massique de CO=0.035

Vitesse de carburant=10m/s  
Vitesse de l'air=30m/s  
Fraction massique de CO=0.032

**Figure IV.15:**Contour de la fraction massique de CO

#### IV.6.Diagramme paramétrique

Les résultats quantitatifs (tableau IV.3) sont visualisés graphiquement dans le plan (fraction massique-*Vair*) sous forme de courbes paramétriques aux différentes valeurs de la vitesse de l'air en fixant la vitesse de carburant ( Fig.IV.16-17). Ces figures montre que fraction massique des réactifs ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  et  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) diminue avec la croissance de la vitesse de l'air et la fraction massique des produits ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  et pour CO) augmente avec l'augmentation de la vitesse d'injection de l'air.

**Tableau IV.3** La vitesse moyenne à sortie (m/s).

Vitesse de l'air (m/s)	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	CO
10	0.525	0.0092	0.00054	0.00544	0.00083	0.050	0.057	0.0190
20	0.350	0.00617	0.00036	0.00036	0.0011	0.069	0.0799	0.0266
30	0.264	0.00465	0.00027	0.00027	0.00124	0.079	0.0912	0.0302

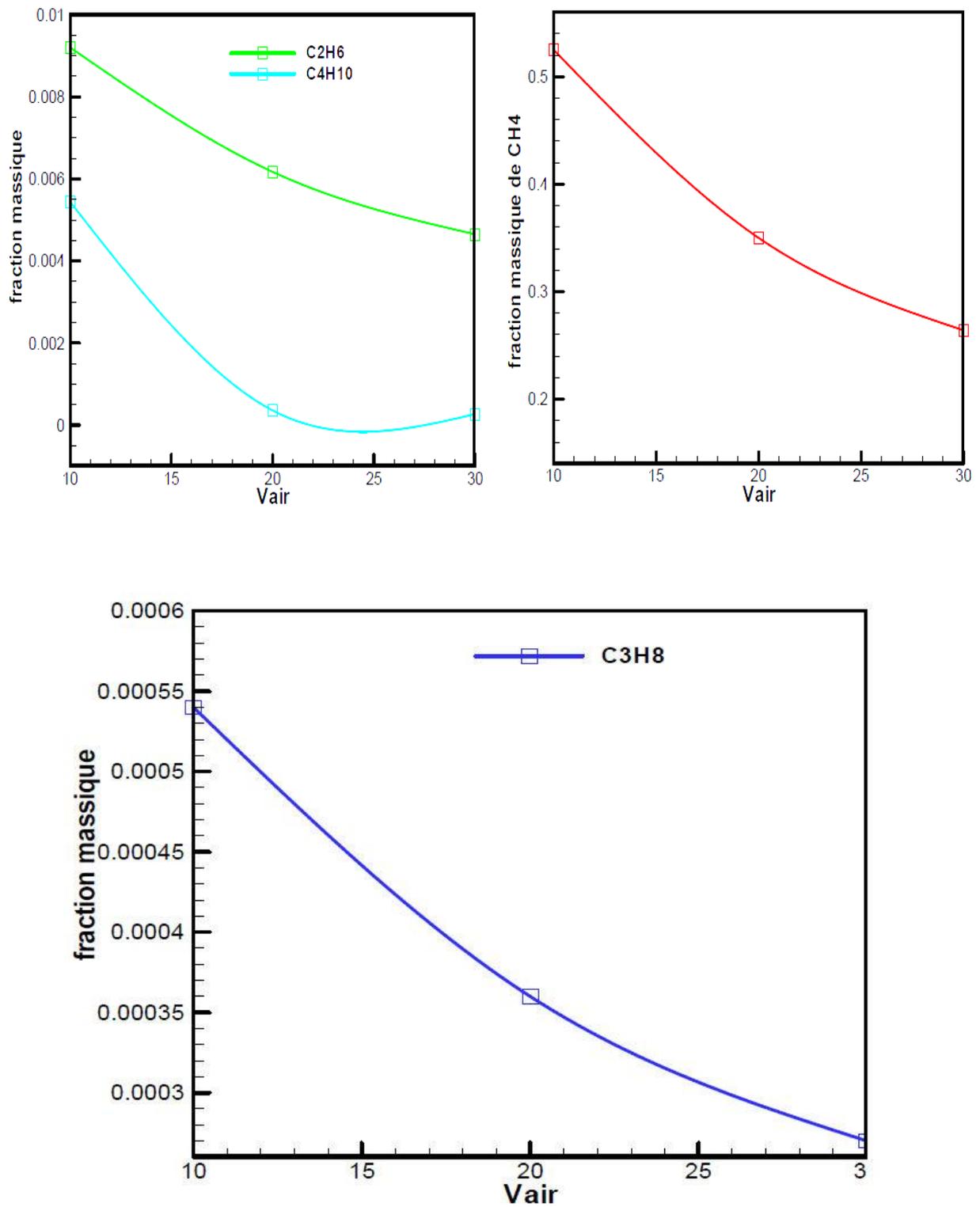


Figure IV.16 : Diagramme paramétrique des réactifs.

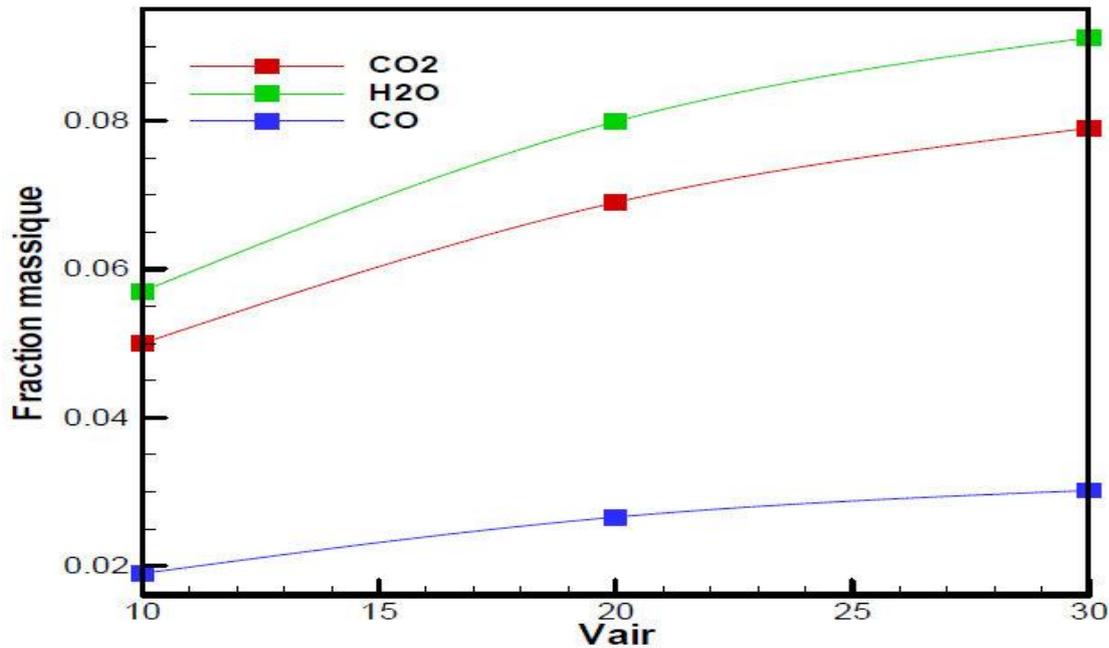


Figure IV.17 : Diagramme paramétrique des produits (fraction massique-Vair).

#### IV.7 .Production des oxydes d'azote (NOx)

La figure (IV.18) montre la fraction massique de NO à la sortie dans le cas de Vair=1020 et 30 m /s) respectivement et Vcarburant =10m/s. En remarquant qu'il ya une croissance de la fraction massique de NO à la sortie avec la croissance de la vitesse d'entrée de l'air. Nous avons constaté que la quantité de carburant injectée par rapport à celle d'oxygène disponible joue un rôle prépondérant sur la formation des polluants. Si elle est trop faible, la température s'élève énormément et des NOx sont formés.

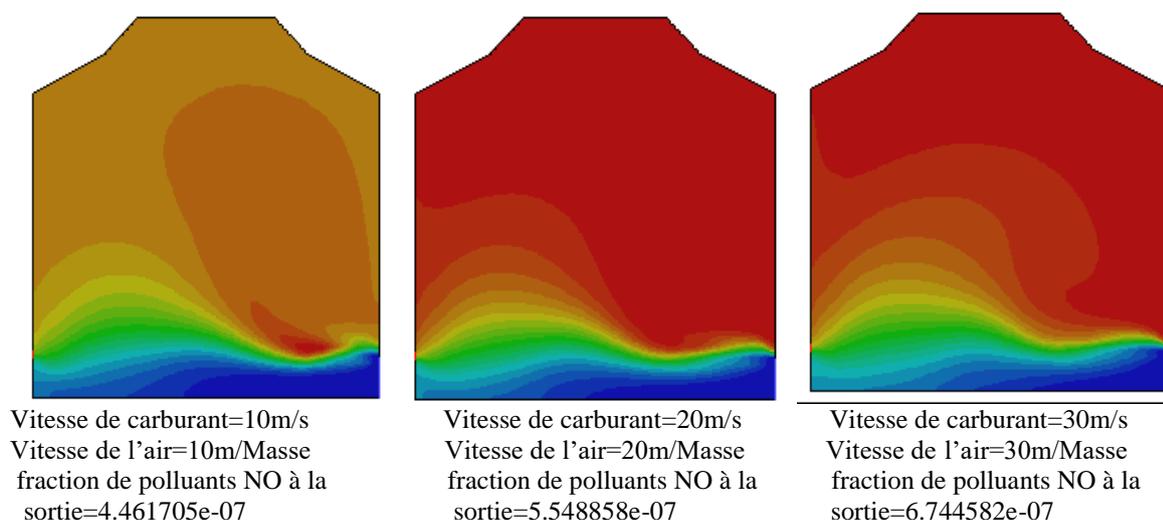


Figure IV.18:Contour de la fraction massique de NO.



